

ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS NUMÉRICOS EM ANÁLISE DINÂMICA DE SUPORTE DE TURBOGERADOR


MOACIR HENRIQUE DE ANDRADE CARQUEJA

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia de Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de *Mestre em Engenharia*.

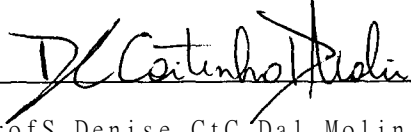
Porto Alegre

Abril de 1996

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de **MESTRE DE ENGENHARIA** e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. Jorge Daniel Riera
Orientador



Prof. S. Denise Ct. C. Dal Molin
Coordenadora do CPGEC

BANCA EXAMINADORA

-Prof. Jorge Daniel Riera ⁿ (orientador)

Ph.D. , University of Princeton/USA

-Prof. Marcelo Ma ia Rocha

Dr . , Univ. Innsbruck, Áustria

-Prof. Ademar Gilberto Groehs

D . Sc . , COPPE/UFRJ

-Prof. Arcanjo Lenzi (UFSG)

Ph.D., Univ. of Southampton/UK

A Leisa, minha doce esposa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jorge Daniel Riera. pela dedicação com que orientou o trabalho, pela transmissão de conhecimentos e, sobretudo, pelo incentivo durante seu desenvolvimento.

À minha família, pela compreensão de que minha ausência seria transitória e pelo estímulo.

Aos funcionários do Centro de Supercomputação, pela inestimável ajuda, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

À COMPUGRAF e Schwendler/McNeal, pela cessão dos sistemas MSC/NASTRAN, MSC/XL e MSC/ARIES e pelo suporte técnico.

Ao sofrido povo brasileiro que custeou este curso e ainda me proporcionou uma bolsa de estudos, mas que em sua grande maioria não consegue terminar o segundo grau.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela atenção e pelos conhecimentos adquiridos.

Aos colegas, pela agradável convivência.

Em especial, a Cezar, Léa e Viviane, que me acolheram durante o período de estudos, tornando-se minha família em Porto Alegre.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise dinâmica do suporte do turboalternador da Usina Termelétrica de Jacuí, para a potência de 350 MW, com três modelos matemáticos distintos por elementos finitos.

o primeiro modelo usa elementos de barras e considera que as colunas sejam engastadas ao nível do topo do bloco; o segundo está desenvolvido com elementos de barras na superestrutura, mas modela o bloco de fundação e as estacas com elementos tridimensionais e elementos especiais de molas, respectivamente; o terceiro modelo é todo desenvolvido com elementos tridimensionais, exceto para as estacas que são modeladas com elementos de molas.

Um resumo das especificações dos fabricantes e da empresa proprietária estão apresentados e discutidos onde foi considerado relevante.

Três análises distintas estão apresentadas para cada modelo:

- Análise modal - onde são determinados os modos naturais até a frequência de 75 Hz;
- Análise no domínio da frequência - que estuda o efeito de uma carga harmônica de 10 kN, variando a frequência de 0 a 75 Hz, aplicada em cada mancai;
- Análise transiente - que estuda o efeito de cargas de curto-circuito e sincronização fora de fase.

Os resultados das análises estão apresentados graficamente e comparados com as especificações de projeto.

Os resultados mais importantes de cada modelo estão apresentados em tabelas e comparados com o objetivo de discutir as incertezas provenientes da modelagem.

Todos os modelos foram calculados por meio do programa MSX/NASTRAN corrido no supercomputador CRAY existente na UFRGS.

Um projeto de instrumentação é apresentado para que se obtenham dados de campo resultantes de ensaios dinâmicos, a serem realizados quando a construção da usina estiver concluída.

ABSTRACT

This work presents a dynamic analysis developed for the 350 MW turbine generator foundation of Jacui Thermal Power Plant, which was made with 3 finite elements distinct models.

Model 1 employs traditional bar elements and supposes that the columns are embedded on the top surface of basement slab; Model 2 is also developed with bar elements for the superstructure but employs tridimensional and special spring elements for the slab and the piles respectively; Model 3 is all developed with tridimensional elements but for the piles which use spring elements.

Condensed specifications from manufacturers and the power plant owner company are presented and discussed where relevant.

For each model 3 distinct analysis are presented:

- Modal analysis - where the normal modes are determined up to the frequency 75 Hz;
- Analysis in the domain of frequency - evaluate the effects of a harmonic 10 kN load, varying from 0 to 75 Hz, applied in each bearing;
- Transient analysis - evaluates the effects of short circuit and synchronization out of phase loads.

The results are presented graphically and are compared to the specifications. Some important results are arranged in tables in order to compare the answers of the different models and discuss the uncertainties that come from modeling.

All models were computed by MSX/NASTRAN program, run in a CRAY computer existing in UFRGS.

An instrumentation project is presented to obtain field data from dynamic testing to be performed in the future, when the construction of the power plant be concluded.

SUMÁRIO

- 1 - INTRODUÇÃO..... 1
- 2 - DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA.....5
 - 2.1 - Descrição genérica.....5
 - 2.2 - Superestrutura.....5
 - 2.3 - Meso-estrutura.....6
 - 2.4 - Infra-estrutura.....6
 - 2.5 - Propriedades do material..... 7
 - 2.6 - Massas e cargas estáticas..... 8
- 3 - AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA.....10
 - 3.1 - Ações.....10
 - 3.2 - Cargas do turbogerador.....11
 - 3.3 - Massas e forças de gravidade..... 12
 - 3.4 - Forças estáticas de operação..... 14
- 4 - CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO..... 17
 - 4.1 - Verificações segundo os fabricantes da turbina e gerador..... 17
 - 4.2 - Verificações de acordo com as especificações da ELETROSUL.....22
 - 4.3 - Análises objeto deste trabalho..... 22
 - 4.4 - Comentários.....22
- 5 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS.....24
 - 5.1 - Introdução.....24
 - 5.2 - Caracterização das incertezas.....24
 - 5.3 - Modelos.....27
- 6 - ANÁLISE MODAL..... 32
 - 6.1 - Método.....32
 - 6.2 - Respostas.....32
 - 6.3 - Comparação dos resultados..... 32

7 - ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	49
7.1 - Procedimentos.....	49
7.2 - Amortecimento.....	50
7.3 - Aplicação da carga no programa MSC/NASTRAN.....	51
7.4 - Análise dos resultados.....	52
7.5 - Comparação dos resultados.....	53
7.6 - Constatações.....	54
8 - ANÁLISE TRANSIENTE.....	76
8.1 - Procedimentos.....	76
8.2 - Amortecimento.....	77
8.3 - Aplicação das cargas e cálculo dos deslocamentos relativos no pro- grama.....	78
8.3.1 - Aplicação das cargas.....	78
8.3.2 - Cálculo dos deslocamentos relativos entre os eixos da turbina de baixa pressão e do gerador.....	81
8.4 - Apresentação dos resultados.....	83
8.5 - Análise dos resultados.....	83
8.6 - Comparação dos resultados.....	84
8.7 - Constatações.....	85
10-CONCLUSÕES.....	110
11 - BIBLIOGRAFIA.....	113
ANEXO - PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO.....	117
A.1 - Instrumentação da estrutura.....	117
A.2 - Determinação experimental dos modos naturais.....	118
A.3 - Determinação das respostas às excitações harmônicas nos mancais..	118

ÍNDICE DAS FIGURAS E GRÁFICOS

Fig. 2.1 - *Vista frontal da maquete* 6

Fig. 2.2 - Vista lateral da maquete 7

Fig. 2.3 - Vista superior da maquete 8

Fig. 3.1 - Vista superior da maquete com as zonas de aplicação de cargas 12

Fig. 4.1 - Deslocamento dos mancais no plano horizontal 19

Fig. 4.1 - Deslocamento dos mancais no plano vertical 20

Fig. 5.1 - Modelo 1 - Diagrama unifilar da estrutura 28

Fig. 5.2 - Modelo 2 - Vista da modelagem da face inferior do bloco de
coroamento das estacas 29

Fig. 5.3 - Modelo 2 - Vista parcial do modelo (visto de baixo) 30

Fig. 5.4 - Modelo 3 - Perspectiva mostrando as massas concentradas no topo
e as molas que simulam solo e estacas 31

Fig. 6.1 - Modelo 1 - Gráfico das frequências naturais 43

Fig. 6.3 - Modelo 1 - Gráfico das densidades modais com intervalos de 10 Hz .44

Fig. 6.3 - Modelo 1 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 5 Hz 44

Fig. 6.4 - Modelo 2 - Gráfico das frequências naturais 45

Fig. 6.5 - Modelo 2 - Gráfico das densidades modais com intervalos de 10 Hz .45

Fig. 6.6 - Modelo 2 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 5 Hz 46

Fig. 6.7 - Modelo 3 - Gráfico das frequências naturais 46

Fig. 6.8 - Modelo 3 - Gráfico das densidades modais com intervalos de 10 Hz 47

Fig. 6.9 - Modelo 3 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 5 Hz	47
Fig. 6.19 - Gráfico das frequências naturais nos 20 primeiros modo naturais	48
Fig. 7.1 - Modelo 1 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção x	60
Fig. 7.2 - Modelo 1 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção y	61
Fig. 7.3 - Modelo 1 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção z	62
Fig. 7.4 - Modelo 1 - Deslocamentos da 1a. sapata do gerador, direções x, y, z	63
Fig. 7.5 - Modelo 1 - Deslocamentos da 2a. sapata do gerador, direções x, y, z	64
Fig. 7.6 - Modelo 2 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção x	65
Fig. 7.7 - Modelo 2 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção y	66
Fig. 7.8 - Modelo 2 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção z	67
Fig. 7.9 - Modelo 2 - Deslocamentos da 1a. sapata do gerador, direções x, y, z	68
Fig. 7.10 - Modelo 2 - Deslocamentos da 2a. sapata do gerador, direções x, y, z	69
Fig. 7.11 - Modelo 3 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção x	70
Fig. 7.12 - Modelo 3 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção y	71
Fig. 7.13 - Modelo 3 - Deslocamentos no 6o. mancai das turbinas, direção z	72
Fig. 7.14 - Modelo 3 - Deslocamentos da 1a. sapata do gerador, direções x, y, z	73
Fig. 7.15 - Modelo 3 - Deslocamentos da 2a. sapata do gerador, direções x, y, z	74
Fig. 7.16 - Gráfico das flexibilidades dinâmicas admissíveis nas sapatas do gerador	75

Fig. 8.1 - Deslocamentos horizontais no gerador	81
Fig. 8.2 - Deslocamentos verticais no lo. mancaí do gerador	81
Fig. 8.3 - Deslocamentos horizontais na turbina de baixa pressão	82
Fig. 8.4 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Gráfico torque/tempo	88
Fig. 8.5 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1a. sapata do gerador	89
Fig. 8.6 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador	90
Fig. 8.7 - Modelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1a. sapata do gerador	91
Fig. 8.8 - Modelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador	92
Fig. 8.9 - Modelo 3 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador	93
Fig. 8.10 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Gráfico torque/tempo	94
Fig. 8.11 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador	95
Fig. 8.12 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador	96
Fig. 8.13 - Modelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos X. Y e Z na 1 a. sapata do gerador	97

Fig. 8.14 - Modelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador 98

Fig. 8.15 - Modelo 3 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1a. sapata do gerador 99

Fig. 8.16 - Modelo 3 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador 100

Fig. 8.17 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Gráfico torque/tempo 101

Fig. 8.18 - Modelo 1 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador..... 102

Fig. 8.19 - Modelo 1 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador1..... 103

Fig. 8.20 - Modelo 2 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador 104

Fig. 8.21 - Modelo 2 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador 105

Fig. 8.22 - Modelo 3 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador 106

Fig. 8.23 - Modelo 3 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador 107

Fig. 8.24 - Curto-circuito trifásico - Gráfico comparativo dos deslocamentos máximos na 1 a. sapata do gerador..... 108

Fig. 8.25 - Curto-circuito bifásico - Gráfico comparativo dos deslocamentos máximos na 1a, sapata do gerador 108

Fig. 8.26 - Sincronização fora-de-fase - Gráfico comparativo dos deslocamentos máximos na 1 a. sapata do gerador 109

Fig. A.1 - Instrumentação para determinação experimental dos modos aturais 113

Fig. A.2 - Instrumentação para determinação das respostas á excitação harmônica 114

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - amplitude
- A_j - jésimo coeficiente
- B - coeficiente
- C - coeficiente exponencial
- C_j - jésima componente
- DY - deslocamento horizontal transversal
- E - módulo de elasticidade (módulo de Young)
- E_b - módulo de elasticidade para o concreto
- e - distância
- F - freqüência
- F_{yi}(y_i) função de distribuição de probabilidades
- f_{ck} - tensão característica do concreto
- G - módulo de elasticidade transversal, coeficiente de amortecimento estrutural
- GE - coeficiente de amortecimento estrutural do elemento
- G_j - jésimo nó ou-ponto escalar
- h - altura
- L_i - distância entre pares de mancais
- l - distância
- m_i - iésima massa modal
- P - ângulo de fase (graus); carga
- P_i - iésima força modal
- P_k - késima carga
- S - fator de escala
- T - tempo, torque
- t - tempo
- u - deslocamentos
- U_j - jésimo grau de liberdade
- w - freqüência
- W₃ - freqüência de interesse
- W₄ - freqüência de interesse

x, X - abscissa segundo eixo longitudinal do turbogerador
 y, Y - ordenada horizontal normal ao eixo do turbogerador
 z, Z - cota vertical normal ao eixo do turbogerador

P_w - resistência cúbica à compressão do concreto

A' - ângulo, deflexão angular

A_i - deflexão

Y - rotação

A_z - diferença de cotas

A_y - deslocamentos

A_t - intervalo de tempo

A'_a - deslocamento angular do eixo

\wedge - coeficiente de amortecimento

V - módulo de Poisson

\wedge - coordenada normalizada

ξ_i - i ésima coordenada normalizada

G - desvio padrão

T - tempo, retardo

$\{p(\tau)\}$ - vetor de cargas no tempo

$\{P(\omega)\}$ - vetor de cargas no domínio da frequência

$\{u\}$ - vetor de deslocamentos

$\{u(t)\}$ - vetor de deslocamentos no tempo

$\{u(\omega)\}$ - vetor de deslocamentos no domínio da frequência

$\{a_{R/R}\}$ - Vetor de variação de forças

$\{8\}$ - vetor dos deslocamentos

$[B]$ - matriz de amortecimento

$[K]$ - matriz de rigidez

$[K_E]$ - matriz de rigidez do elemento

$[M]$ - matriz de massa

$[M_j]$ - matriz dos coeficientes de linha de influência do eixo

$[\phi]$ - matriz de forma dos modos

(U_e) - conjunto de pontos

1 - Introdução.

A engenharia brasileira já tem tradição no projeto de centrais hidrelétricas de grande porte e tem resolvido as dificuldades técnicas surgidas com notável eficiência. Recentemente, em função da exploração quase total do manancial hídrico das regiões sul e sudeste, que são as mais desenvolvidas do país, começaram a surgir usinas térmicas com máquinas de porte grande, tanto a carvão, como nucleares.

Como conseqüência deste processo torna-se necessária a criação de referências e desenvolvimento de técnicas de projeto, construção e acompanhamento para plantas térmicas por parte da engenharia brasileira. Dentro desta linha situa-se este trabalho.

A análise, projeto e verificação de estruturas suportes de turboalternadores e equipamentos similares apresenta, na prática, várias dificuldades. Uma delas é a definição da estrutura, pois as seções transversais dos membros são usualmente irregulares e existem plataformas, passarelas e tubulações cujas massas e rigidezes se somam às da estrutura propriamente dita, que são difíceis de serem quantificadas sendo, normalmente, negligenciadas. As imprecisões resultantes afetam principalmente os resultados para as freqüências afastadas da freqüência fundamental.

Outra dificuldade é conseqüência de não se conhecer o comportamento de estruturas deste tipo na faixa de operação dos equipamentos. Ainda, existem poucas referências bibliográficas sobre o assunto.

Dadas as razões acima, decidiu-se estudar detalhadamente uma estrutura deste tipo, objetivando adicionar elementos ao processo e buscar subsídios ao assunto.

Duas usinas termelétricas a carvão com turboalternadores de 350 MW estão sendo construídas na região sul, a saber, Jorge Lacerda IV em Santa Catarina e Jacuí I no Rio Grande do Sul. Delas, a usina Jacuí I está com o andamento das obras lento e não há previsão para o seu término em curto prazo, o que toma a estrutura suporte do turboalternador adequada ao estudo, pois ainda permite a apresentação de um projeto de instrumentação, para aferição dos resultados teóricos obtidos, em tempo hábil.

Neste trabalho apresenta-se uma análise dinâmica da estrutura suporte do turboalternador da Usina Termelétrica Jacuí I (ver descrição no capítulo 3), com

potência de 350 MW, com três modelos analíticos distintos e são discutidos os resultados. Os resultados da análise dinâmica feita para o projeto da usina foram incluídos como um quarto modelo na análise modal. As análises desenvolvidas seguem as especificações e critérios estabelecidos pela proprietária da usina, ELETROSUL, constantes dos documentos técnicos por ela fornecidos (ELETROSUL - DOCUMENTOS TÉCNICOS), listados nas referências bibliográficas.

Observa-se que na área de confiabilidade estrutural, assim como no desenvolvimento de normas técnicas, crescente atenção vem sendo dada à questão da variabilidade introduzida nos resultados pelo modelo de cálculo. Por exemplo, a experiência desenvolvida pelo “CIGRE Working Group” (CIGRE - 1987), na qual os esforços internos de uma torre de linha de transmissão foram determinados por 20 equipes de consultores e projetistas diferentes, mostrou que os valores encontrados podem divergir consideravelmente. Entre os valores computados citam-se as forças estimadas nos membros, com o mínimo de variação de $\pm 4,4\%$ e o máximo de $\pm 22,0\%$, ficando a média em $\pm 10,7\%$; para as resistências estimadas nos membros, os valores encontrados são, respectivamente, $\pm 7,7\%$, $\pm 27,9\%$ e $\pm 14,6\%$; para as resistências estimadas nas estruturas os valores variaram em torno da média de $\pm 13,3\%$.

É lógico supor que esta variação entre resultados, obtidos por diferentes projetistas ou através de diferentes modelos, ocorra em qualquer tipo de estrutura como, por exemplo, uma estrutura suporte de equipamento turboalternador. Devem ocorrer diferenças entre análises diferentes, tanto para cargas estáticas, como dinâmicas, sendo estas últimas razão especial para esta pesquisa, dadas as incertezas que envolvem.

Existem diversos programas de cálculo pelo método dos elementos finitos que podem ser empregados na análise das estruturas de suporte para cálculo estático e dinâmico de esforços e deflexões, baseados usualmente em algoritmos diferentes. Somando-se a isso que cada engenheiro fará a modelagem da estrutura de acordo com sua experiência e com diferentes graus de refinamento, os resultados serão provavelmente diferentes.

Dentro dessa linha de pesquisa desenvolvida pelo “CIGRE Working Group” (CIGRE - 1987) e, aproveitando a disponibilidade dos recursos computacionais da Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, decidiu-se pela constituição de 3 modelos de cálculo diferentes para a mesma estrutura, que em forma sucinta são;

- modelo 1, com elementos de pórtico espacial, tendo as colunas engastadas ao nível do apoio no bloco de fundação;
- modelo 2, também com elementos de pórtico espacial, mas incluindo o bloco de fundação modelado com elementos de volume;
- modelo 3, todo com elementos de volume.

o trabalho foi desenvolvido com o auxílio do programa de cálculo por elementos finitos MSC/NASTRAN 67.5, instalado em supercomputador CRAY YMP2E/232 com as características:

- velocidade de pico de processamento de 330 MFLOPS por unidade central;
- palavra de 64 bits;
- memória compartilhada de 256 Mb;
- memória de massa de 16 Gb em disco magnético;
- sistema operacional UNICOS;

e dos pré/pós-processadores MSC/XL e MSC/ARIES, instalados nas estações gráficas SILICON-GRAPHICS, de modelos INDIGO e CRIMSOM.

Todos os sistemas acima estão operando no Centro Nacional de Supercomputação

- Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Este trabalho é embasado na análise dinâmica do cavalete do turbogerador da Usina Termelétrica Jacuí I. Os documentos de projeto disponíveis foram estudados e interpretados e um resumo com cargas atuantes e critérios de verificação estão apresentados. A análise da estrutura com três modelos segue os mesmos padrões de objetivos dos engenheiros consultores tradicionais, isto é, procura-se determinar se as respostas estão adequadas às especificações. Para cada um dos modelos estão desenvolvidas: análise modal, análise no domínio da frequência e análise transiente. A análise modal está desenvolvida para obtenção de todos os modos desde 0 até 75 Hz em todos os modelos. Análise no domínio da frequência, de acordo com as especificações técnicas, está desenvolvida para uma carga de 10 kN variando desde 0 a 75 Hz. A análise transiente abrange os carregamentos de curto-circuito bifásicos e trifásicos e sincronização fora-de-fase.

Finalmente, uma vez que a avaliação definitiva de uma análise é dada pela verificação experimental da estrutura, um projeto de instrumentação está incluído no último capítulo deste trabalho, cujo objetivo é comparar os resultados teóricos com as respostas dinâmicas da estrutura logo após sua construção e, depois, durante o período de operação.

2 - Descrição da Estrutura.

2.1 - Descrição genérica.

A Usina Termelétrica Jacuí I é um empreendimento de propriedade da ELETRO-SUL. Trata-se de uma usina a carvão mineral com capacidade nominal de 350 MW, estando atualmente em construção. É, juntamente com a Usina Termelétrica Jorge Lacerda IV de mesma potência e também em construção, a maior termelétrica deste tipo no Brasil.

Seu equipamento turbo-gerador compõe-se de três turbinas em série, acionadas por vapor de água a alta, média e baixa pressão, tendo um eixo comum com o equipamento gerador (alternador). As turbinas são de fabricação NEI Parsons (Inglaterra) e o gerador Alsthom (França) e Viliars (Brasil).

O objetivo deste estudo é analisar a estrutura de suporte do equipamento turbo-gerador acima citado, cuja geometria foi desenvolvida pelos próprios fabricantes para que se apresentasse com rigidez compatível com as suas necessidades. Coube à engenharia brasileira desenvolver os cálculos e o detalhamento das armaduras, bem como verificar se o conjunto satisfaria os critérios de projeto.

A estrutura de suporte, também denominada cavalete, compõe-se de uma grelha (raft), também denominada mesa, onde se aloja o equipamento turbo-alternador, 6 pares de colunas com cerca de 11,0 m de altura, um bloco de fundações de espessura variando em torno de 5,0 m apoiado em 56 estacas escavadas de 1,0 m de diâmetro. Para facilitar a visualização e posterior modelagem matemática da estrutura foi construída uma maquete de madeira em escala 1:50, da qual algumas fotografias encontram-se adiante.

2.2 - Superestrutura.

A grelha (raft), onde está apoiado o equipamento turbo-gerador, é composta de duas vigas longitudinais (longarinas), quatro vigas transversais (transversinas) de seção variável e um bloco que corresponde à fusão de duas transversinas e duas longarinas em uma peça única. Tem um comprimento total de 34,997m e largura de 11,62m, totalizando 510 m³ de concreto.

Variações bruscas nas dimensões das seções das vigas, mostradas nas figuras 2.1, 2.2 e 2.3, são necessárias para o apoio dos equipamentos.

As propriedades de projeto para o concreto são:

- resistência característica $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$,
- módulo de Young $E = 32.000 \text{ MPa}$.

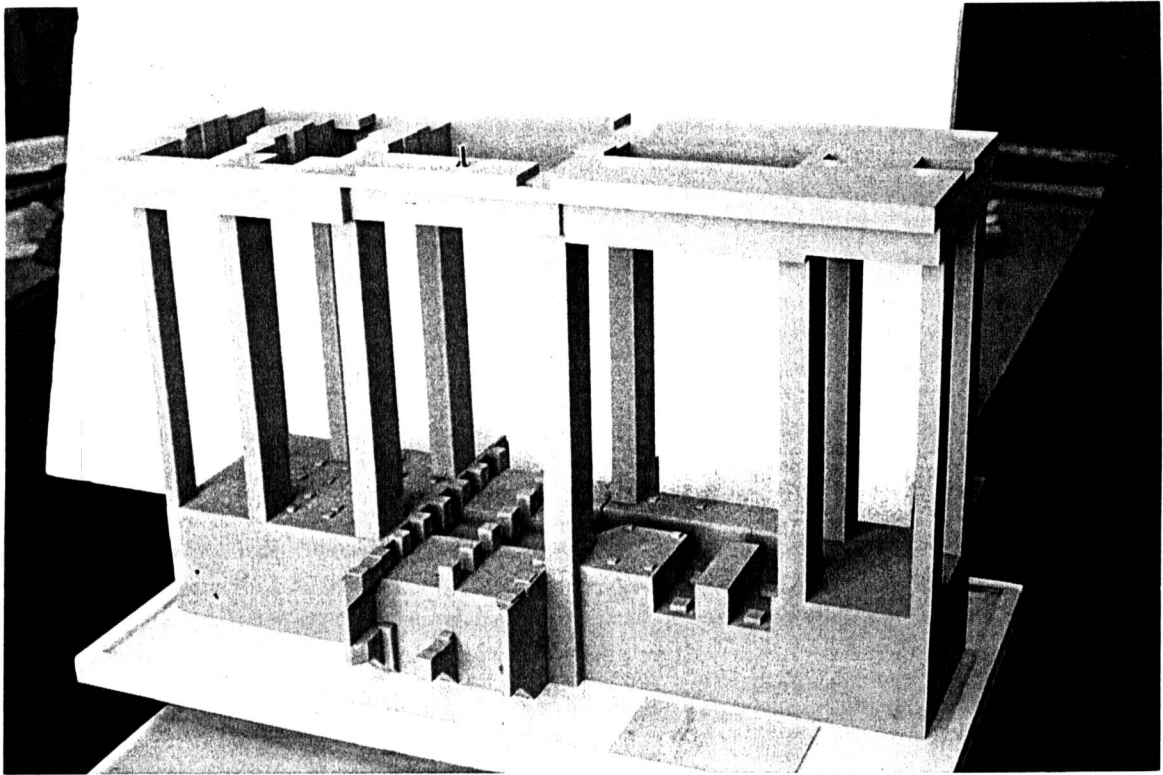


Fig. 2.1 - Vista frontal da maquete. Observar que um parafuso apoiado sobre a mesa corresponde a uma pessoa de 1,7m de estatura.

2.3 - Meso-estrutura.

As colunas apresentam seção retangular e constante sendo iguais duas a duas, semelhantes a pilares de pontes com dois fustes, totalizando 375 m^3 . O concreto apresenta as mesmas características indicadas em 3.2.

2.4 - Infra-estrutura.

O bloco de fundação tem espessura máxima de 5,3m, apresentando em sua superfície superior diversos bloquetes para apoio de equipamentos auxiliares, sulcos para tubulação de água de refrigeração e alguns rebaixos. O volume previsto de

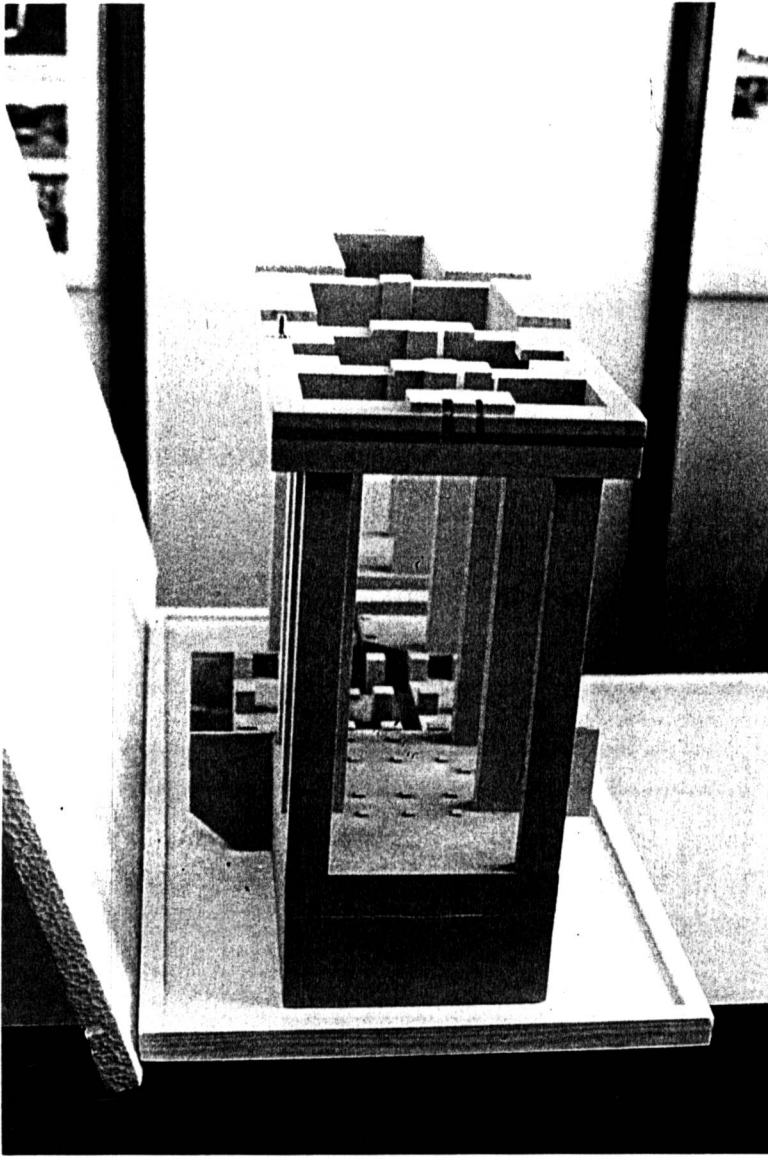


Fig . 2.2 - Vista lateral da maquete.

concreto é de 1615 m^3 . Esta geometria complexa pode ser percebida nas fotos da maquete (figuras 2.1, 2.2 e 2.3).

As estacas, todas escavadas de diâmetro $1,0 \text{ m}$, apoiam-se em estrato de pedregulhos, atravessando várias camadas de sedimentos. A capacidade admissível de cada estaca é de 3.950 kN . Tanto o bloco como as estacas apresentam as seguintes propriedades:

- resistência característica $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$,
- módulo de elasticidade $E = 26.000 \text{ MPa}$.

2.5 - Propriedades do material.

A partir da resistência característica do concreto, obtêm-se os módulos de Young (E) com base na norma DIN-1045.

Tem-se, para concreto $f^{cc} = 25 \text{ MPa}$:

$$P_w = 1,25 f_{ck} = 1,25 \times 25 = 31,25 \text{ MPa}$$

$$P_w = 312,5 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$E_b = 18.000 \sqrt{P_w} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$$

$$E_b = 18.000 \sqrt{312,5} = 318.198 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$E_b = 320.000 \text{ Kgf/cm}^2 = 3,2 \times 10^8 \text{ N/cm}^2 = 3,2 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Este valor pode ser superior no caso de solicitações dinâmicas (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977). Adotou-se o valor $3,2 \times 10^8 \text{ Pa}$.

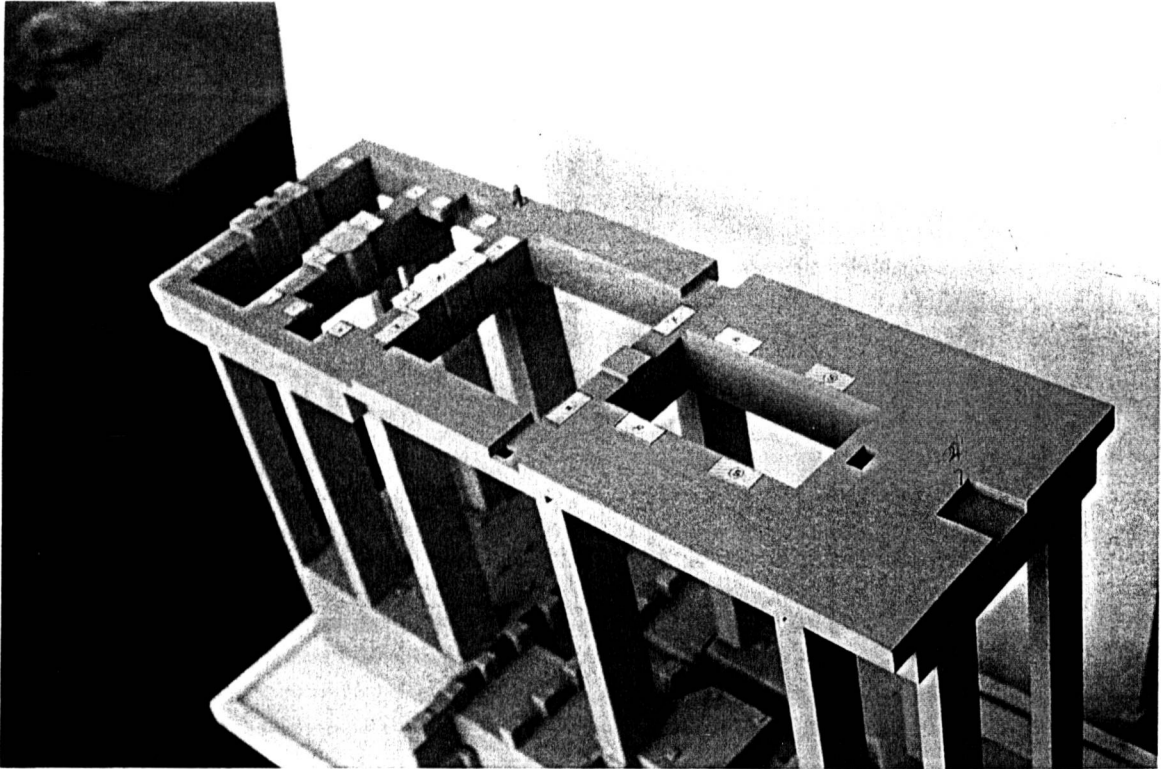


Fig. 2.3 - Vista superior da maquete.

Para concreto $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$:

$$\beta_w = 1,25 f_{ck} = 1,25 \times 15 = 18,75 \text{ MPa}$$

$$\beta_w = 187,5 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$E_b = 18.000 \text{ (Kgf/cm}^2)$$

$$E_b = 18.000 \times 187,5 = 246.475 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$E_b = 250.000 \text{ Kgf/cm}^2 = 2,5 \times 10^8 \text{ N/cm}^2 = 2,5 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Adotou-se o valor $2,5 \times 10^8 \text{ Pa}$.

Para o cálculo do módulo de elasticidade transversal (G) adotou-se o coeficiente de Poisson $\nu = 0,1667$. O programa NSC/NASTRAN calcula G automaticamente.

2.6 - Massas e cargas estáticas.

As massas e as forças de gravidade decorrentes da estrutura de concreto são determinadas pelo programa a partir dos elementos geométricos e das massas específicas das barras. Além dessas massas devem ser acrescentadas as massas dos equipamentos (ver capítulo 3).

3 - Ações Atuantes na Estrutura.

Neste capítulo estão descritas as ações que atuam na estrutura, provenientes do equipamento turboalternador e de equipamentos auxiliares principais situados ao nível da mesa da estrutura, conforme especificações dos fornecedores dos equipamentos e da própria ELETROSUL. A terminologia adotada é a mesma encontrada nos documentos técnicos fornecidos pela ELETROSUL, especialmente em "Regras para Fundações de Turbogeneradores" (VILLARES -1986).

3.1 - Ações.

- Ações permanentes:

São as cargas que existem no momento em que se conclui a linha de árvores, constituídas pelas cargas estáticas, ou seja, do peso do grupo e de todos os materiais fixos à mesa da estrutura de suporte, inclusive ela própria.

- Ações variáveis:

São aquelas que se exercem sobre a estrutura, devidas ao funcionamento do turbogenerador. Elas compreendem:

- forças de atrito devidas aos deslocamentos e às deformações do equipamento suportado pela estrutura,
- forças devidas ao momento nominal.

- Ações acidentais:

São devidas ao momento máximo em caso de pane elétrica. Os valores indicados não levam em conta o efeito de amplificação proveniente da estrutura. As cargas de curto-circuito e de sincronização fora de fase foram excluídas das ações variáveis em razão da sua brevidade de aplicação. Elas, entretanto, provocam uma torção na mesa superior da estrutura levando ao nível da linha das árvores uma aceleração altíssima dos rotores e um ângulo A' .

- Ações dinâmicas:

São as forças girantes situadas sobre o eixo da máquina na linha dos mancais à velocidade nominal, criadas por um deslocamento residual, normalmente moderado, agindo durante todo o tempo de funcionamento do turbogenerador.

3.2 - Cargas do Turbogenerador.

Estão indicadas a seguir as massas e os esforços produzidos pelo equipamento turbogenerador, bem como as coordenadas de seus pontos de aplicação. Estão especificadas nos documentos TURBINE SUPPORT STRUCTURE LOADING DIAGRAM (NEI -1983) e CARGAS NAS FUNDAÇÕES (VILLARES -1986).

A estrutura deve ser dimensionada para estas ações, que atuam ao nível da mesa, e outras que atuam em níveis abaixo da mesa, provenientes de equipamentos auxiliares.

- Pontos de aplicação de cargas e massas.

a) - Turbinas

As três turbinas (alta, média e baixa pressões) têm seus eixos ligados de topo e, cada uma, tem dois pares de mancais onde se transmitem os esforços à estrutura - ver tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Coordenadas dos centros de massa e dos pontos de aplicação das cargas oriundas das turbinas e equipamentos auxiliares.

Posição da carga	Coordenadas	Equipamento
A	x=3,000 y=3,810 z=16,245	Cestas de vapor de alta pressão
B	x=7,340 y=3,810 z =16,245	Cestas de vapor de alta pressão
C	x=9,045 y=3,810 z=16,245	Cestas de reaquecimento de vapor
D	x=11,245 y=3,810 z=16,245	Cestas de reaquecimento de vapor
E	aplicada em F	Mancai número 1, bloco e pedestal
F	x=3,182 y=0,915 z =17,765	Placa do cilindro de alta pressão
G	aplicada em H e J	Mancais número 2 e 3, bloco e pedestal
H	x=7,012 y=0,915 z= 17,765	Cilindro de alta pressão, bloco do mancai
J	x=7,902 y=1,050 z=17,765	Cilindro de alta pressão, bloco do mancai
K	x=12,970 y=0,450 z =17,765	Mancai número 4, suporte e pedestal
L	x=12,464 y=1,310 z=17,765	Placa do cilindro de média pressão
M	x=14,279 y=2,825 z=17,765	Base do cilindro de baixa pressão
N	x=20,871 y=2,825 z=17,765	Base do cilindro de baixa pressão

b) - Gerador.

As cargas originadas pelo gerador aplicam-se nas quatro placas de apoio (sapatas), conforme a tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Coordenadas das quatro placas de apoio do gerador, duas a duas.

Posição da placa.	Coordenadas (m)
R	$x=24,335 \ y=\pm 2,375 \ z=17,765$
S	$x=29,185 \ y=\pm 2,375 \ z=17,765$

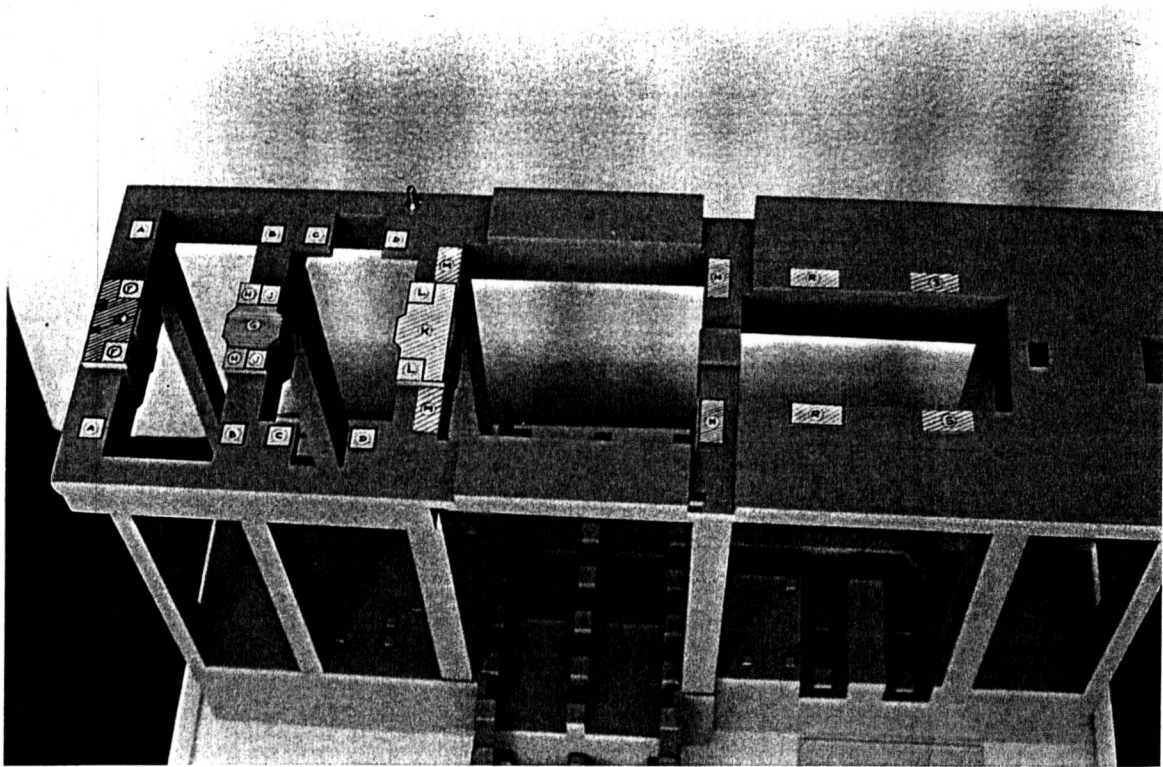


Fig. 3.1 - Vista superior da maquete com as zonas de aplicação de cargas.

3.3 - Massas e forças de gravidade.

a) - Massas das turbinas e seus equipamentos auxiliares.

A seguir apresenta-se a tabela 3.3 com as massas referidas ao local onde estão assentadas (as forças verticais podem ser obtidas através do produto das massas pela aceleração da gravidade). Os pontos de aplicação das cargas e os seus

respectivos valores estão especificados nos documentos "ARRANGEMENT & DETAILS OF TURBINE CONCRETE SUPPORT STRUCTURE" - NEIP 4501FB10 sheets 1@3 e "TURBINE SUPPORT STRUCTURE LOADING DIAGRAM" - NEIP 4501FB10-ML

Tabela 3.3 - Massa dos equipamentos apoiados na mesa.

Posição	Equipamento	Massa
A	Cestas de vapor de alta pressão	14.400 kg
B	Cestas de vapor de alta pressão	14.400 kg
C	Cestas de reaquecimento de vapor	10.500 kg
D	Cestas de reaquecimento de vapor	10.500 kg
E	Mancai número 1, bloco e pedestal	(13.750 kg) As massas estão aplicadas nos pontos F
F	Placa do cilindro de alta pressão	$10.100 + (0.5 \times 13.750) = 16.975 \text{ kg}$
G	Mancais número 2 e 3, bloco e pedestal	(6.000 kg) dividida pelos pontos H e J
H	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do mancai	$15.000 + (0.25 \times 6.000) = 16.500 \text{ kg}$
J	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do mancai	$21.600 + (0,25 \times 6.000) = 23.100 \text{ kg}$
K	Mancai número 4, suporte e pedestal	(20.000 kg) dividida em dois pontos
L	Placa do cilindro de média pressão	14.000 kg
M	Base do cilindro de baixa pressão	64.000 kg
N	Base do cilindro de baixa pressão	64.000 kg

b) - Massas do gerador.

A massa total do gerador, incluindo as placas de fundação, é de 274.000 kg. correspondendo a 68.500 kg em cada placa. Os valores das massas e cargas oriundas do alternador foram obtidos nos documentos "DIMENSÕES EXTERNAS - ALTERNADOR" - VILLARES - 29E117005-rev 1c - 25/01/88 e "FOLHA DE CÁLCULO" - VILLARES - CGV I11101 - 09/07/86.

Tabela 3.4 - Massas do gerador.

Posição da placa.	Massa
R	68.500 kg
8	68.500 kg

3.4 - Forças estáticas verticais de operação.

São provenientes do torque de operação do equipamento, tendo sentido para cima em um dos lados e para baixo no lado oposto.

a) - Turbinas (ver tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Forças estáticas de operação nas turbinas.

Posição	Equipamento	Força estática
F	Placa do cilindro de alta pressão	±61.600 N
H	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do mancai	±61.600 N
J	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do mancai	±88.000 N
L	Placa do cilindro de média pressão	±68.000 N
M	Base do cilindro de baixa pressão	±31.000 N
N	Base do cilindro de baixa pressão	±31.000 N

Além dessas, deve-se adicionar as forças de vácuo no condensador (tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Forças estáticas de vácuo no condensador.

Posição da carga	Equipamento	Força
M	Base do cilindro de baixa pressão	1.260.000 N
N	Base do cilindro de baixa pressão	1.260.000 N

b) - Gerador (ver tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Força estática de operação do gerador.

Posição da placa.	Força estática
R	±98.000 N
8	±98.000 N

3.5 - Forças dinâmicas de operação.

São cargas no topo da estrutura devidas a desbalanceamento de muita importância dos eixos. Somente a carga de um dos eixos (alta pressão, média pressão, baixa

pressão ou gerador) atua em cada vez. As componentes vertical e horizontal atuam em seqüência, não simultaneamente. Oscilam à velocidade da máquina e parte da componente vertical do gerador a 2 vezes a velocidade da máquina.

a) - Turbinas.

As forças dinâmicas de operação estão apresentadas nas tabelas 3.8 e 3.9 para as direções verticais e horizontais transversais , respectivamente.

Tabela 3.8 - Forças dinâmicas verticais de operação.

Posição	Equipamento	Força
E	Mancai número 1, bloco e pedestal	(±138.000 N)- Dada a rigidez do bloco a carga será aplicada em F (2 x 69.000 N).
H	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do mancai	±69.000 N
J	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do manca!	±133.500 N
K	Mancai número 4, suporte e pedestal	±267.000 N
M	Base do cilindro de baixa pressão	±288.000 N
N	Base do cilindro de baixa pressão	±288.000 N

Tabela 3.9 - Forças dinâmicas transversais de operação.

Pos.	Equipamento	Força
E	Mancai número 1, bloco e pedestal	(±138.000 N)- Dada a rigidez do bloco a carga será aplicada em F (2 x 69.000 N).
G	Mancais número 2 e 3, bloco e pedestal	±267.000 N divididas por H e J
H	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do mancai	±69.000 N (proveniente de G)
J	Placa do cilindro de alta pressão e bloco do manca!	±69.000 N (proveniente de G)
K	Mancai número 4, suporte e pedestal	±267.000 N
A1	Ancoragem transversal do cilindro de baixa pressão	±576.000 N
Bl	Ancoragem transversal do cilindro de baixa pressão	±576.000 N

b) Gerador.

Tem-se 3 casos de cargas dinâmicas de curta duração (Transientes):
- Curto-circuito trifásico;

- Curto-circuito bifásico;
- Sincronização fora de fase.

Para os casos acima estão especificadas as equações dos torques aplicados pelo gerador à estrutura em função do tempo.

- Torque devido a curto-circuito trifásico (m.N):

$$T = 1,0922 \times 10^6 [1,255e^{-11'952t} + 6,531e^{-12,751t} \sin(1207\pi t)] \quad (3.1)$$

A expressão acima está representada em forma de gráfico na figura 8.1.

- Torque devido ao curto-circuito bifásico (m.N):

$$T = 1,0922 \times 10^6 [1,425 e^{-11'423t} + 6,73j e^{-9,949t} \sin(120\pi t) - 0,0757 e^{-6,671t} \cos(1207\pi t) - 3,272 e^{-6,669t} \sin(2407\pi t)] \quad (3.2)$$

A expressão acima está representada em forma de gráfico na figura 8.8.

- Torque devido à sincronização fora-de-fase (m.N):

$$T = 1,0922 \times 10^6 \{0,0788 + 3,726 e^{-11'475t} + [4,406 \sin(1207\pi t) - 2,679 \cos(1207\pi t)] e^{-12,627t}\} \quad (3.3)$$

A expressão acima está representada em forma de gráfico na figura 8.13.

4 - Critérios de verificação.

Neste capítulo estão condensadas as verificações necessárias de rigidezes estáticas e dinâmicas segundo os fabricantes dos equipamentos e da ELETROSUL, conforme o documento "ENERCONSULT - JACUI Í - THERMAL POWER PLANT - STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS - TECHNICAL REPORT - PART 1".

4.1- Verificações segundo os fabricantes da turbina e gerador.

a) - Análise Estática.

- Deflexão vertical relativa.

Cada par de mancais das turbinas que esteja apoiado em uma mesma transversina deve ser analisado, e deve atender ao requerimento de que nenhum par de mancais sofra uma deflexão vertical relativa maior do que 0,2 mm.

As cargas que devem ser consideradas para esta análise são:

- Cargas de expansão térmica:

-Gerador, atrito nos chumbadores, axial;

-Turbina, carga de expansão térmica axial, alta, média e baixa pressão;

-Turbina, carga de expansão térmica, axial, alta e média pressão.

-Carga estática de vácuo do condensador.

- Mudança na curvatura dos eixos.

A mudança na curvatura dos eixos, estimada a partir das deflexões de 3 pares de mancais adjacentes das turbinas não deve exceder 30 x IO-® /m. Para atender este requerimento as deflexões relativas do item anterior são ignoradas e o valor adotado é a média das deflexões verticais de cada par de mancais .

A mudança de curvatura é estimada por:

$$\frac{2}{L_{i-i}+L_j} \left(\frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{L_{i+i} L_i} + \frac{\Delta_i - \Delta_{i+1}}{L_{i+i} L_i} \right) \quad (41)$$

sendo:

A_i = deflexão

L_i = distância entre pares de mancais.

Cargas a serem consideradas nesta análise:

-Cargas de expansão térmica:

- Gerador, atrito nos chumbadores, axial;
- Turbina, carga de expansão térmica axial, alta, média e baixa pressão;
- Turbina, carga de expansão térmica, axial, alta e média pressão.
- Carga estática de vácuo do condensador.

-Carga *estática de vácuo no* condensador.

-Efeitos térmicos na estrutura:

- Operação no verão;
- Operação no inverno;

-Retração.

Estas cargas são combinadas com e sem retração para um tempo correspondente á vida útil da máquina, estimada em 30 anos.

- desalinhamento no plano vertical entre os eixos da turbina (baixa-pressão) e o gerador.

Devem ser determinadas as variações de força nos mancais em função das variações da altura dos mancais, não sendo admitidas variações maiores do que 20% em relação á situação de referência (ver comentário ao final do capítulo).

$$\{AR/R\}=[M_i] \{S\} \quad (4.2)$$

onde:

$\{AR/R\}$ = vetor das variações de força (%);

$[M_i]$ = matriz dos coeficientes de linha de influência do eixo;

$\{S\}$ = vetor dos deslocamentos.

Cargas a serem consideradas nesta análise:

-Cargas de expansão térmica:

- Gerador, atrito nos chumbadores, axial;
- Turbina, carga de expansão térmica axial, alta, média e baixa pressão;
- Turbina, carga de expansão térmica, axial, alta e média pressão;
- Turbina, carga de expansão térmica transversal, alta, média e baixa pressão;
- Turbina, carga de expansão térmica, transversal, alta e média pressão.
- Carga estática de vácuo do condensador.

- Carga estática de vácuo no condensador.
- Efeitos térmicos na estrutura:
 - Operação no verão;
 - Operação no inverno;
- Retração.

- desalinhamento no plano vertical entre os eixos da turbina (baixa-pressão) e o gerador.

As cargas que devem ser consideradas são aquelas que podem ocorrer após o alinhamento do eixo.

- Gerador, atrito nas placas e chumbadores, antimétricas;
- Gerador, atrito nas placas e chumbadores, simétricas;
- Gerador, atrito nos chumbadores, axial;
- Turbina, expansão térmica, axial, alta e média pressão;
- Turbina, expansão térmica, transversal, alta, média e baixa pressão, antimétrica;
- Turbina, expansão térmica, transversal, alta e média pressão, antimétrica;

Aa' é positivo quando 'n' gira no sentido trigonométrico em relação a 'n-1'.

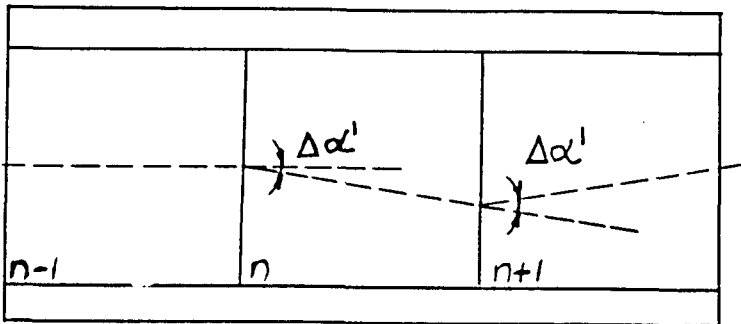


Figura 4.1 - Deslocamento dos mancais no plano horizontal.

-Turbina, expansão térmica, transversal, alta e média pressão, antimétrica;
Tais cargas são combinadas com e sem deformação lenta.

o deslocamento diferencial vertical das longarinas resulta em rotação y do plano neutro da transversina na linha do eixo e um deslocamento horizontal do mancai ou dos dois mancais situados sobre a transversina igual a

$$A_{yi} = y(e + \wedge) \quad (4.3)$$

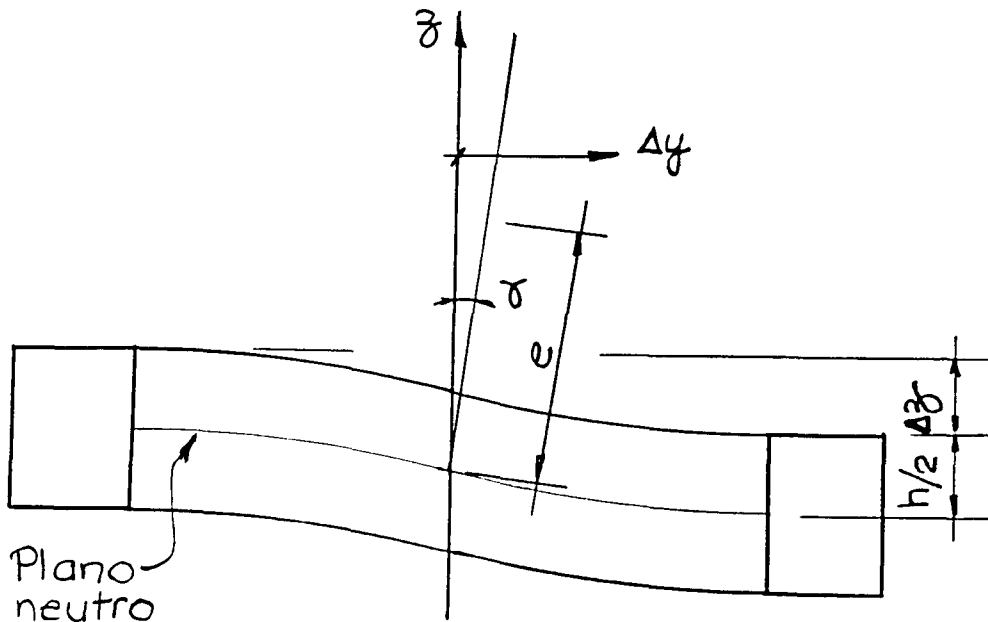


Figura 4.2 - Deslocamento dos mancais no plano vertical.

Sendo;

e = distância do plano das sapatas ao eixo da máquina (1,135 m);

$h/2$ = distância da LN da transversina ao plano das sapatas (2,755 / 2 = 1,378 m);

Y = rotação da LN da transversina, com:

A_z

$" = T$

A_z = diferença de altura das longarinas na linha dos apoios do estator;

L = distância entre apoios perpendicularmente ao eixo do estator.

Os deslocamentos horizontais dos mancais são causados por:

a - deslocamentos verticais diferenciais dos apoios sobre as longarinas;

b - deslocamentos horizontais dos apoios sobre as longarinas.

O deslocamento total do mancai será:

$$A_y = A_{y1} + A_{y2}$$

De posse dos A_y de cada mancai pode-se calcular $A_{a'}$ entre cada segmento do eixo.

Estabelece-se a seqüência:

- medir as deformações nos apoios na direção vertical;

- calcular A_y , em cada caso;
- medir A_{y2} (média);
- calcular A_y ;
- calcular A_a ;
- calcular $A_a' = A_a] + A_{t2}$

b) - Análise dinâmica.

- Segundo o fabricante das turbinas.

É necessário o cálculo da flexibilidade dinâmica de cada mancai das turbinas e o correspondente fator de ganho que não deve exceder a unidade. Para verificar este requerimento será considerada uma carga de 10.000 N girando desde 0 até 72 Hz em cada um dos 6 mancais da turbina (ver comentário ao final do capítulo).

- Segundo o fabricante do gerador.

É necessário calcular todas as frequências naturais e as deformações dos modos correspondentes que estejam na banda -10% a +20% da frequência de operação da máquina, e em qualquer das deformadas dos modos em que o foco do deslocamento ocorra em uma placa de apoio do gerador.

É necessário calcular a flexibilidade dinâmica de cada mancai do gerador, que não deve ultrapassar os valores;

- $2\text{nm}/10.000\text{ N}$ para a banda de frequência de 55 a 65 Hz;
- $5 (60/f_p)^2 \text{ } ^\text{m}/10,000\text{ N}$ para a banda de frequência de 0 a 72 Hz, exceto a banda anterior.

Estas amplitudes devem ser calculadas nas placas de base do gerador.

A carga a ser considerada neste requerimento é uma força de 10.000 N girando de 0 a 72 Hz em todos os suportes.

É necessário calcular o desalinhamento relativo entre os eixos do gerador e da turbina de baixa pressão, da mesma forma que na análise estática, no plano horizontal para as condições dinâmicas de emergência.

Para atender o requerimento devem ser consideradas as equações que representam as reações no estator para os carregamentos;

- Torque devido a curto-circuito trifásico (m.N);
- Torque devido a curto-circuito bifásico (m.N);

- Torque devido a sincronização fora de fase (m.N):

4.2 - Verificações de acordo com as especificações da ELETROSUL.

- Análise Estática.

A deflexão relativa do eixo do gerador sob a carga vertical de 10.000 N aplicada em qualquer placa de apoio do gerador não deve exceder 0,6 p.m.

4.3 - Análises objeto deste trabalho.

Dentre as análises especificadas pelos fabricantes de equipamentos e pela proprietária (ELETROSUL), são motivo de tratamento deste trabalho as seguintes:

a) - Análise modal.

São determinados todas frequências naturais entre 0 e 75 Hz. Embora não seja especificado o cálculo de todos os modos, é importante que seja desenvolvido para que sejam introduzidas cargas ressonantes com as frequências naturais na análise no domínio da frequência.

b) - Análise no domínio da frequência.

É aplicada uma carga harmônica de 10 kN nos 5o. e 6o. mancais da turbina e em cada sapata de apoio do turboalternador, variando a frequência desde 0 até 75 Hz. Esta carga é obtida pela aceleração centrípeta de uma massa girando em torno de um eixo paralelo ao eixo da máquina.

c) - Análise transiente.

São aplicadas as cargas correspondentes aos torques devidos a curto-circuito trifásico, curto-circuito bifásico e sincronização fora-de-fase.

4.4 - Comentários.

As especificações acima apresentadas são uma coletânea (resumida) de documentos técnicos pertencentes ao conjunto do projeto da usina Jacuí I. São fruto de especificações de diferentes fabricantes participantes do consórcio de empresas fornecedoras, da proprietária e de empresas de consultoria nacionais e estrangeiras, cada qual escrevendo a sua parte em seu próprio idioma. A aglutinação de todos os documentos é tarefa complexa por apresentarem desuniformidade de termos técnicos e repetitividade de especificações com tolerâncias distintas, possibilitando In-

interpretações incorretas e estarem fragmentados em cartas, telexes, desenhos, atas de reunião, etc. Muitas vezes foi necessário o contato com o autor do documento para interpretação do texto.

Algumas referências conceituais não estão adequadas, como no cálculo dos deslocamentos horizontais entre o eixo da turbina e o eixo do gerador, onde se apresenta a equação (4.2). O produto de coeficientes da matriz da *linha de influência das reações de apoio* pelos deslocamentos dá como resposta um valor de forças $\{R\}$ nos apoios e não $\{AR/R\}$ representado em porcentagem como está no texto. Além disso, a formulação com matriz de coeficientes de linha de influência é pouco comum, sendo usual uma formulação com matrizes de rigidez ou flexibilidade. Também, na especificação para análise dinâmica, segundo o fabricante da turbina, consta que todas as frequências devem ser verificadas desde 0 até 72 Hz e que o fator de ganho não pode ser maior que a unidade em nenhum caso. Ora, isso é praticamente impossível. Certamente alguma frequência será ressonante e apresentará fator de ganho maior que 1. Com a interpretação de que pequenos deslocamentos são fundamentais na faixa de frequências próximas à de operação, sugere-se que o texto seja alterado reduzindo-se para o intervalo de 55 a 65 Hz a imposição de que os fatores de ganho sejam menores do que 1.

5 - Descrição dos modelos

5.1 - Introdução.

Neste capítulo são descritos os três modelos empregados para determinar a resposta da estrutura às ações indicadas no capítulo anterior. Trata-se de um problema clássico da análise; definida a excitação e o sistema, isto é, a estrutura, deseja-se determinar a resposta. Com esse objetivo a estrutura deve ser representada por meio de um modelo matemático, o qual será discutido a seguir.

5.2 - Caracterização das incertezas.

Na engenharia moderna, especialmente em aplicações de tecnologia de ponta ou em obras de características incomuns, não é mais suficiente a previsão da resposta, para fins de verificação de projeto, especificando apenas o seu “valor esperado”, isto é, o “melhor estimador” de acordo com o projetista. Deve-se conhecer também a variabilidade da estimativa, assunto tratado em **Confiabilidade Estrutural**, disciplina que procura determinar a propensão à falha (ou não-falha) de sistemas estruturais submetidos à ação do homem e da natureza.

De acordo com o **Projeto de Norma CLAES 1** (Riera e Rocha - 1993), identificam-se as incertezas;

- *Incerteza fenomenológica.*

A incerteza fenomenológica é a incerteza associada à ocorrência de eventos imprevisíveis por desconhecimento de aspectos físicos do problema. Não se pode associar propensões a estes eventos, uma vez que eles não estão presentes de forma explícita na formulação do problema.

Esta categoria de incertezas pode ser relevante para projetos ousados, nos quais se avança além dos limites do estado da arte, ou para projetos de sistemas estruturais envolvendo novos materiais, sujeitos a condições de carga e serviço pouco conhecidas ou extremas. Assim, a consideração da incerteza fenomenológica no projeto de um sistema estrutural só pode ser atualmente levada em conta de forma estritamente subjetiva, merecendo assim ser tópico de pesquisa adicional.

- *Incerteza de avaliação.*

A incerteza de avaliação é a incerteza associada à definição e à quantificação do desempenho do sistema estrutural, bem como à caracterização dos estados de falha e não-falha. Isto se verifica principalmente nos modos de falha relacionados com o estado limite (capacidade) de utilização.

- *Incerteza de modelagem.*

A incerteza de modelagem, característica da fase de projeto, é a incerteza decorrente do uso de modelos matemáticos para representar o comportamento do sistema estrutural, frente às ações externas ou estados iniciais que lhe são impostos. Nestes modelos ficam estabelecidas relações de interdependência entre as variáveis de estado que são apenas aproximações ou simplificações das relações observadas no sistema estrutural real.

A incerteza de modelagem depende portanto da abrangência do conhecimento disponível sobre o comportamento do sistema estrutural. Observando-se que este conhecimento não é o mesmo para diferentes projetistas ou especialistas envolvidos, a incerteza de modelagem resulta estar também associada a fatores humanos, que constituem por si só uma categoria especial.

Pode-se quantificar a incerteza de modelagem através da variabilidade de resultados provenientes de diferentes modelos propostos, todos eles aceitáveis para o sistema estrutural em questão.

- *Incerteza física.*

A incerteza física é a incerteza que resulta da aleatoriedade inerente a algumas das variáveis do problema. Exemplos típicos desta aleatoriedade são a variabilidade de ações externas como o vento ou excitação sísmica, presentes na fase de operação ou utilização, ou, ainda, a variabilidade das propriedades geométricas e mecânicas do material através do seu volume, introduzidas na fase de construção e afetadas pela operação ou utilização.

A forma usual de se considerar a incerteza física é através da caracterização das variáveis por meio de funções de distribuição de probabilidade, $F_y^*(y_j)$, as quais são em geral obtidas da aplicação de modelos estatísticos a observações experimentais.

Com o auxílio da Teoria da Confiabilidade de Sistemas pode-se, então, analisar o desempenho do sistema estrutural em termos probabilísticos.

- Incerteza estatística.

A incerteza estatística é a incerteza que resulta da definição da verossimilhança de um evento relevante para o desempenho do sistema estrutural com base na respectiva probabilidade. Por exemplo, não se pode medir a variabilidade na tensão de escoamento de todas as barras de aço que se utilizam na construção de uma estrutura metálica, porém, apenas a de uma quantidade limitada de amostras; a variabilidade na tensão de escoamento das barras restantes precisa, então, ser estimada por meio de parâmetros que apresentam incerteza estatística.

Uma forma de se considerar a incerteza estatística no projeto do sistema estrutural é por meio da análise da sensibilidade das medidas de confiabilidade frente a variações nos valores atribuídos as verossimilhanças relevantes. Caso esta sensibilidade seja considerada como significativa, recomenda-se que sejam feitas mais observações do evento em questão ou, caso isto não seja possível, que sejam adotadas alterações ou complementações na concepção do sistema estrutural, ou ainda, que aumentem as exigências em termos das medidas de confiabilidade.

- Fatores humanos.

A incerteza devida a fatores humanos está presente ao longo de todas as fases da obra. Estes fatores podem ser subdivididos em dois grupos principais:

1) erros humanos e 2) intervenção humana.

Os erros humanos implicam tanto na variabilidade do desempenho humano como em atos grosseiramente errôneos. Por outro lado, a intervenção humana se reflete na redução ou compensação dos erros humanos através de medidas precativas ou corretivas.

Observa-se, portanto, que a confiabilidade do sistema estrutural está fortemente condicionada pelos procedimentos adotados nas diversas fases da obra, tanto no sentido de reduzir a influência de erros humanos como para facilitar a intervenção humana caso uma falha, humana ou estrutural, tenha sido reconhecida.

Devido à sua complexibilidade, o comportamento humano ainda não pode ser claramente relacionado aos diversos fatores que o influenciam. Contudo, a variabilidade de desempenho, por exemplo, o percentual de erros em procedimentos

rotineiros, pode ser quantificada e considerada explicitamente na análise da confiabilidade do sistema estrutural.

5.3 - Modelos.

Após o reconhecimento de que parte da incerteza de previsão é devida ao modelo (matemático) de análise e aos processos, procedimentos e hipóteses utilizados pelo projetista, a quantificação da mesma adquire grande importância no desenvolvimento de normas e critérios de projeto. Assim, além de contribuir na compreensão de procedimentos de análise de fundações de turbogeradores, o presente trabalho visa a obtenção de dados adicionais sobre a contribuição do modelo, isto é, todo o procedimento da análise, na incerteza de previsão.

Com os objetivos citados, a estrutura em estudo foi representada por meio de três modelos, com as seguintes características básicas:

- Modelo 1.

Estrutura de pórtico espacial, com barras prismáticas retas, totalizando 169 nós, 147 elementos e 762 graus de liberdade, com os pilares engastados na base. Considera-se que o modelo, pela sua simplicidade e dimensões poderia ter sido empregado em escritório de cálculo de pequeno porte, com disponibilidade limitada de equipamentos (hardware) e programas (software).

Detalhes do modelo 1 podem ser vistos no anexo.

- Modelo 2.

Trata-se, também, de um modelo de pórtico espacial, mas com maior número de graus de liberdade, incluindo base e solo cuja flexibilidade é levada em conta por meio de molas de rigidez equivalente. Possui 760 nós, 619 elementos e 2352 graus de liberdade. Considera-se que o modelo poderia ter sido desenvolvido em escritório de pequeno a médio porte, com acesso a recursos computacionais de pouca sofisticação para os padrões atuais.

- Modelo 3.

Modelo detalhado da estrutura, com elementos finitos tridimensionais, totalizando 8616 nós, 4740 elementos e 25.767 graus de liberdade. Exige amplos recursos computacionais.

Figura 5.1 - Modelo 1 - Diagrama unifilar da estrutura.

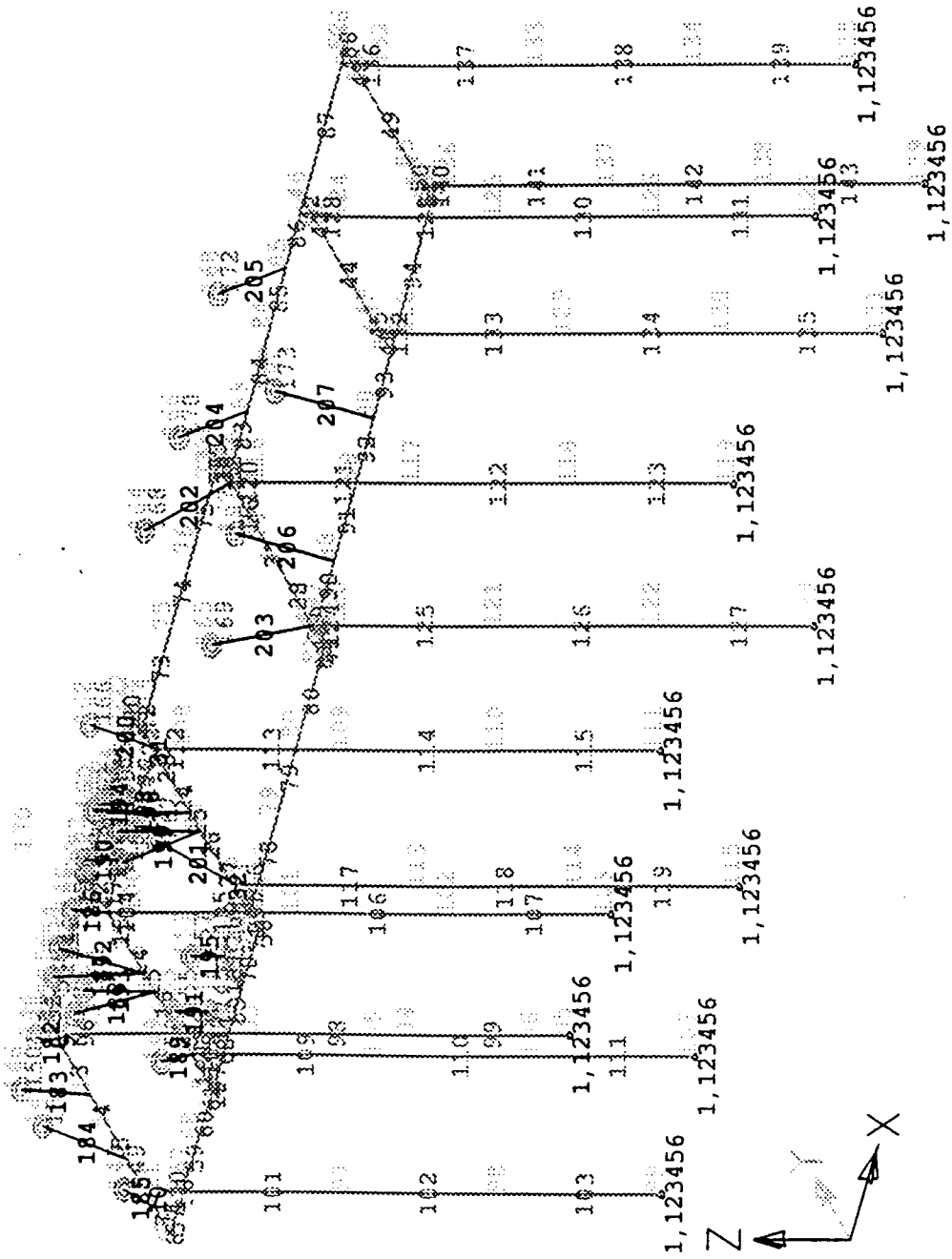


Figura 5.2 - Modelo 2 - Vista da modelagem da face inferior do bloco de coroamento das estacas.

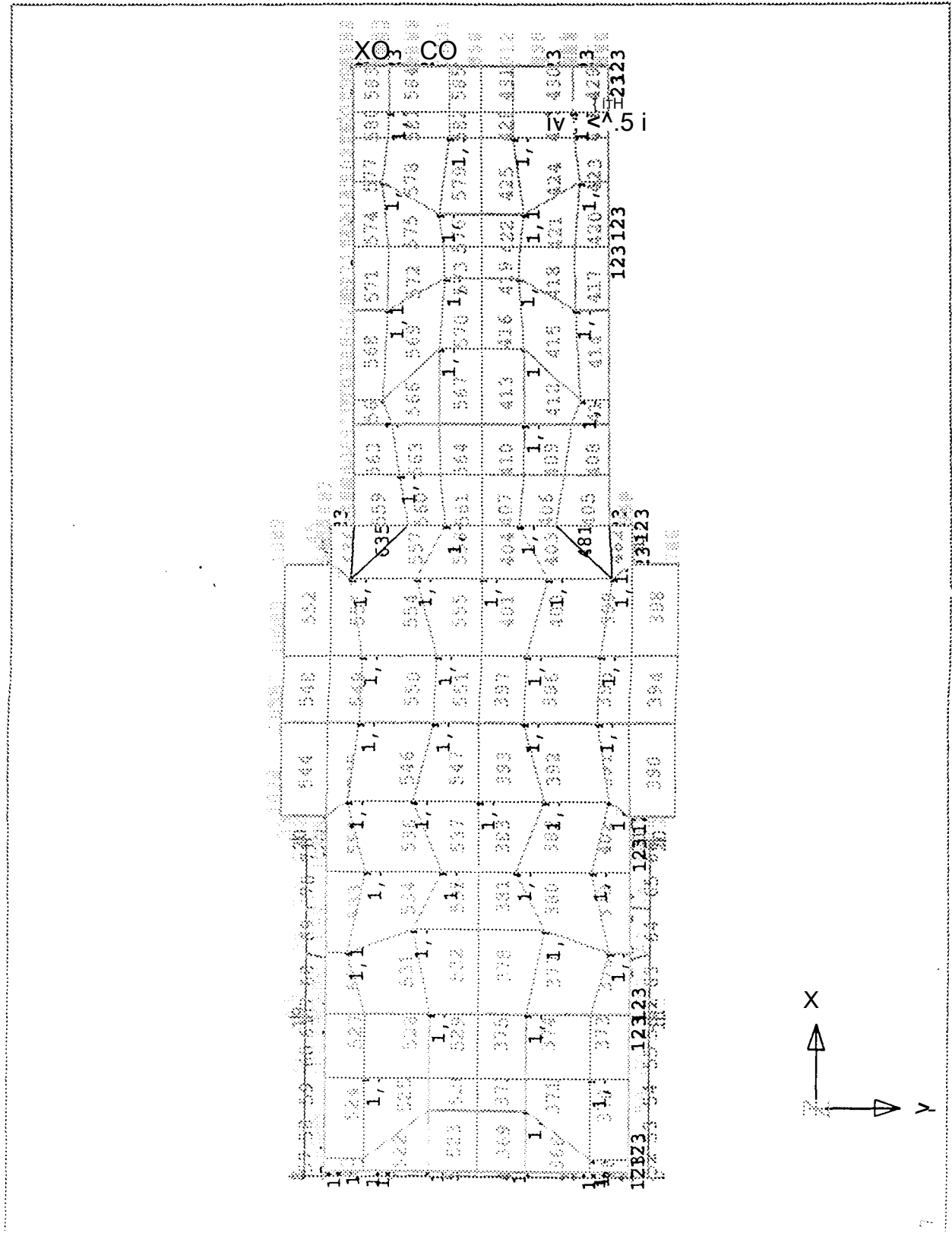


Figura 5.3 - Modelo 2 - Vista parcial do modelo (visto de baixo).

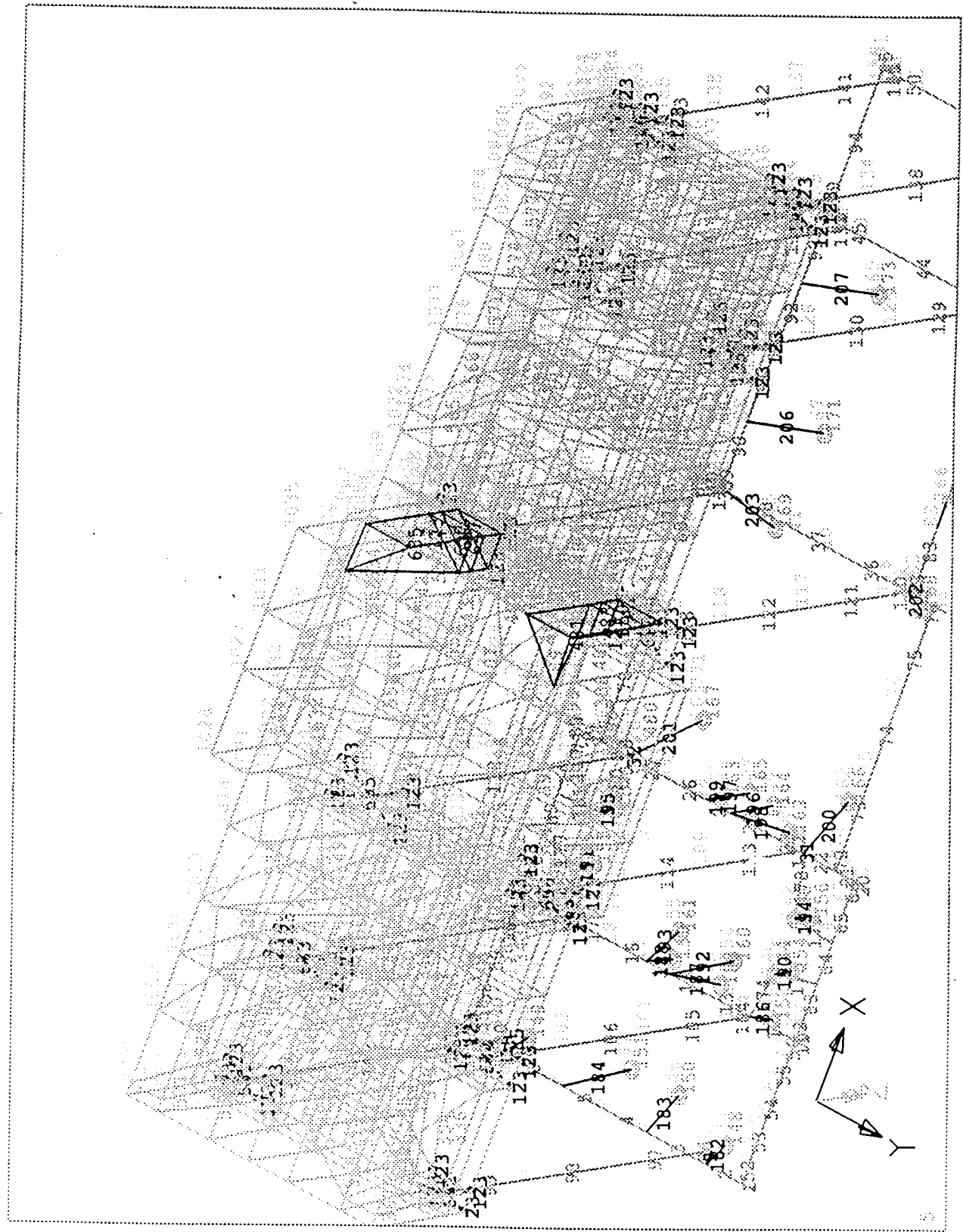
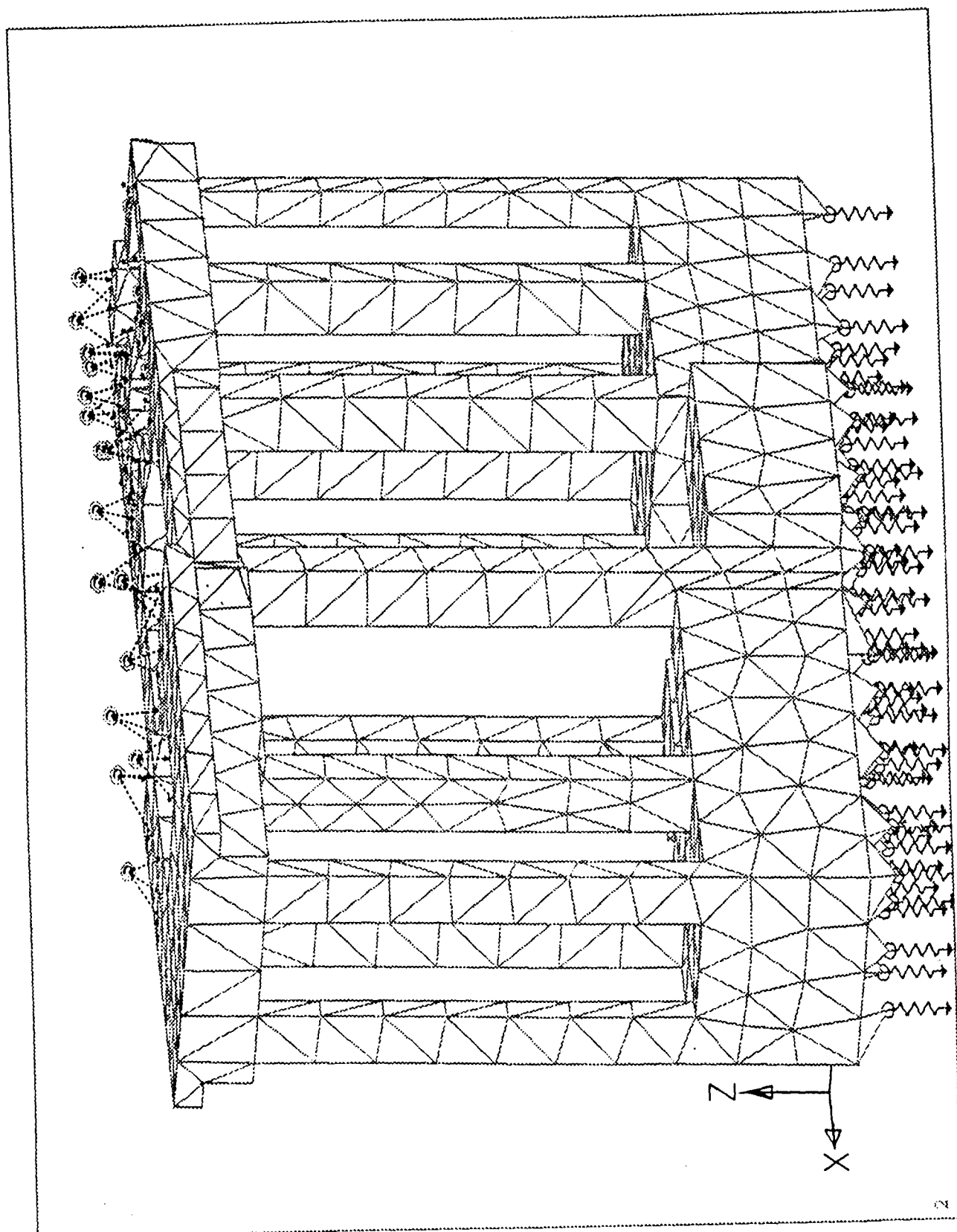


Figura 5.4 - Modelo 3 - Perspectiva mostrando as massas concentradas no topo e as molas que simulam solo e estacas.



6 - Análise Modal

6.1 - Método.

Dentre os métodos disponíveis no programa MSC/NASTRAN, foi escolhido o método de Lanczos, que segundo o seu manual é o mais eficiente para problemas com muitas raízes. Antes de ser definido o método, foram feitas experiências com os modelos 1 e 2 para comparar o desempenho e a acuidade de alguns dos métodos disponíveis no programa, onde o método de Lanczos confirmou ser mais rápido e não foram observadas variações nos resultados dos métodos testados. Para o modelo 3 não foram feitas pesquisas de desempenho por serem corridas muito longas.

Foram determinadas todas as frequências naturais no intervalo fechado desde 0 até 75 Hz. Os comandos necessários para aplicação no programa, iguais para todos os modelos, estão apresentados no quadro 6.1.

Dispõe-se das respostas para frequências (até 72,8 Hz) e modos naturais do modelo adotado para o desenvolvimento do projeto da Usina de Jacuí, neste capítulo denominado modelo 4, elaborado com elementos de barras que inclui o bloco de coroamento. Não se dispõe de informações sobre o método utilizado, sabendo-se que foi calculado com o programa STARDYNE.

6.2 - Respostas.

Os 40 primeiros modos naturais estão apresentados de forma comparativa na tabela 6.1. Um estudo comparativo está numericamente apresentado na tabela 6.2, cujos valores são importante constatação.

No intervalo entre 0 e 75 Hz, as respostas obtidas apresentaram para cada um dos modelos;

- modelo 1; encontrados 99 modos naturais;
- modelo 2; encontrados 118 modos naturais;
- modelo 3; encontrados 131 modos naturais;
- modelo 4; sem dados para o intervalo.

As listagens das corridas estão apresentadas nos quadros 6.2 a 6.4 e gráficos com a distribuição das frequências podem ser vistos nas figuras 6.1 a 6.9.

Alem dos modelos 1 a 3, dispõe-se dos resultados da análise elaborada para a ELETROSUL, que constituem um importante subsídio para comparação.

6.3 - Comparação dos resultados.

Toda análise estrutural deve ser acompanhada de uma crítica das respostas, onde o analista avalia se os valores obtidos estão dentro de limites razoáveis. Tais limites podem ser estabelecidos por comparação com outros resultados ou por lógica, como, por exemplo, os sinais de momentos fletores que em determinados pontos são conhecidos a priori. Um primeiro julgamento dos resultados se faz com a comparação das respostas na tabela 6.1, que apresenta os primeiros 40 modos de cada modelo.

Na medida em que as freqüências dos modos naturais vão se afastando da freqüência fundamental, aumenta a divergência de seus valores de um modelo para o outro e nos modelos mais sofisticados aumenta o número de modos naturais no intervalo e, em freqüências mais altas não é mais possível identificar o mesmo modo nos quatro modelos. No caso presente, pode-se considerar que os 20 primeiros modos, dada pequena dispersão de resultados em torno da média, sejam os mesmos em todos eles. Esta hipótese tem confirmação, para os três modelos desenvolvidos neste trabalho, nas animações feitas com o programa pós-processador MSC/XL. A figura 6.10 apresenta um gráfico com as freqüências naturais dos 20 primeiros modos, onde se percebe uma esperada maior rigidez no modelo 1, que não considera a flexibilidade das fundações considerando que as colunas são engastadas ao nível do topo do bloco. Nos três modos iniciais a mesa (raft) se comporta como um diafragma quase rígido, onde no 1o. modo a mesa vibra deslocando-se no sentido do eixo X, no 2o. modo no sentido do eixo Y e no 3o. modo girando em torno do eixo Z. Isso explica o salto encontrado no gráfico entre o 3o. e 4o. modos em todos os modelos.

Um índice de variação dos resultados é apresentado na tabela 6.2, obtido da média dos desvios-padrão dos valores das freqüências normalizados em relação á média. O índice obtido de 6,5% está abaixo do encontrado na experiência do CIGRE Working Group (CIGRE - 1987) para médias dos resultados para forças e resistências estáticas, que variam entre 10,7% e 14,6% para os grupos de resposta apresentados na tabela 1.1. Para as freqüências baixas as respostas dos quatro modelos apresentam razoável convergência, que permitem inferir que problemas de análise, que necessitem apenas dos modos baixos, não requerem modelos muito sofisticados.

Tabela 6.1 - Comparação de resultados das 40 primeiras frequências naturais.

	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
MODOS	FREQUÊNCIA	FREQUÊNCIA	FREQUÊNCIA	FREQUÊNCIA
No.	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)
1	1.55	1.47	1.73	1.8
2	2.84	2.11	2.26	2.6
3	3.10	2.63	2.86	3.0
4	7.11	6.98	8.27	7.0
5	9.15	9.03	10.27	8.8
6	10.39	10.12	11.67	10.2
7	10.68	10.38	11.97	10.4
8	11.68	11.53	12.83	10.7
9	12.43	11.91	12.89	11.8
10	12.50	12.03	13.44	11.9
11	13.15	12.85	13.74	12.8
12	13.34	13.06	13.91	13.1
13	15.06	13.70	14.26	13.5
14	15.83	13.99	14.45	14.9
15	16.77	14.40	14.64	15.6
16	17.37	14.99	15.29	15.8
17	17.50	15.26	15.94	16.8
18	17.77	15.77	16.17	16.9
19	18.27	16.01	16.47	17.0
20	18.66	16.31	17.14	17.4
21	19.34	16.42	17.64	14.5
22	19.78	16.49	17.83	17.7
23	20.11	16.95	18.01	17.8
24	20.12	17.12	18.69	18.3
25	21.19	17.83	18.93	18.6
26	22.29	17.96	19.59	19.7
27	23.28	18.42	19.80	20.2
28	23.59	19.45	20.19	20.8
29	23.98	20.01	20.71	21.3
30	24.35	20.17	21.08	21.9
31	24.83	20.72	21.55	22.2
32	25.31	21.49	21.79	22.4
33	25.42	22.01	21.92	24.4
34	26.15	22.81	22.76	25.1
35	26.57	23.90	22.85	25.3
36	26.70	23.99	24.51	25.9
37	27.38	24.21	24.60	26.1
38	28.21	24.80	25.03	26.7
39	29.04	25.53	25.23	26.9
40	29.16	25.55	25.40	27.1

Tabela 6.2 - Coeficiente de variação dos valores das 20 primeiras frequências naturais.

	MODELO 1	M0DEL02	MODELO 3	MODELO 4		DESVIO	COEF. DE
MODO	FREQ.	FREQ.	FREQ.	FREQ.	MÉDIA	PADRÃO	VARIAÇÃO
No.	f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	f ₄ (Hz)	f _m (Hz)	(a)	(o/fm)
1	1.55	1.47	1.73	1.80	1.64	0.153134	0.093495
2	2.84	2.11	2.26	2.60	2.45	0.329450	0.134343
3	3.10	2.63	2.86	3.00	2.90	0.205977	0.071078
4	7.11	6.98	8.27	7.00	7.34	0.622011	0.084756
5	9.15	9.03	10.27	8.80	9.31	0.655391	0.070365
6	10.39	10.12	11.67	10.20	10.60	0.722428	0.068184
7	10.68	10.38	11.97	10.40	10.86	0.755990	0.069630
8	11.68	11.53	12.83	10.70	11.68	0.875094	0.074896
9	12.43	11.91	12.89	11.80	12.26	0.504151	0.041129
10	12.50	12.03	13.44	11.90	12.47	0.700709	0.056206
11	13.15	12.85	13.74	12.80	13.14	0.430532	0.032773
12	13.34	13.06	13.91	13.10	13.35	0.391816	0.029340
13	15.06	13.70	14.26	13.50	14.13	0.697011	0.049325
14	15.83	13.99	14.45	14.90	14.79	0.782653	0.052904
15	16.77	14.40	14.64	15.60	15.35	1.078151	0.070223
16	17.37	14.99	15.29	15.80	15.86	1.056705	0.066616
17	17.50	15.26	15.94	16.80	16.38	0.977806	0.059711
18	17.77	15.77	16.17	16.90	16.65	0.879991	0.052851
19	18.27	16.01	16.47	17.00	16.94	0.977714	0.057720
20	18.66	16.31	17.14	17.40	17.37	0.973004	0.056000
					17.80	SOMA =	1.291554
					18.03	MÉDIA =	0.064577

Quadro 6.1 - Comandos para determinação das frequências naturais.

```
SOL 103
...
SUBCASE 1
$ DEFINE O COMANDO QUE CONTÉM O MÉTODO
  METHOD = 1
...
$ DEFINE O MÉTODO DE LANCZOS PELO COMANDO EIGRL
EIGRL 1              75.
...
$ DEFINE AMORTECIMENTO ESTRUTURAL DE 0,01
PARAM,G,0.02
```

Quadro 6.2 - Modelo 1 - Autovalores e frequências naturais.

1	JANUARY 5, 1995 MSC/NASTRAN 2/18/93 PAGE 1		
0	NASTRAN EXECUTIVE	CONTROL	DECK ECHO
0			
ID	MSC-XL, MSC-NASTRAN		

Quadro 6.2 - Modelo 1 - Autovalores e freqüências naturais (continuação).

SOL 103
TIME 5
CEND

1 MSC/NASTRAN ----- MSC/XL
PAGE 2
MODELO 1
0 ANALISE MODAL COM MASSAS DOS EQUIPAMENTOS INCLUÍDAS

END OF LANCZOS RUN
COMPLETTON FLAG = 0
NO. OF MODES COMPUTED = 99

EIGENVALUE ANAL YSIS SUMMARY (LANCZOS ITERATION)

BLOCK SIZE USED..... 7

NUMBER OF DECOMPOSITIONS..... 4

NUMBER OF ROOTS FOUND..... 99

NUMBER OF SOLVES REQUIRED..... 43

TERMINATION MESSAGE : REQUIRED NUMBER OF EIGENVALUES FOUND.

1 MSC/NASTRAN----- MSC/XL
PAGE 18
MODELO 1
0 ANALISE MODAL COM MASSAS DOS EQUIPAMENTOS INCLUÍDAS

MODE NO.	EXTRACTION ORDER	REAL EIGENVALUES		CYCLES	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
1	1	9.508895E+01	9.751356E+00	1.551977E+00	1.000000E+00	9.508895E+01
2	2	3.179949E+02	1.78324 1E+01	2.838116E+00	1.000000E+00	3.179949E+02
3	3	3.797674E+02	1.948762E+01	3.101551E+00	1.000000E+00	3.797674E+02
4	4	1.995592E+03	4.467205E+01	7.109777E+00	1.000000E+00	1.995592E+03
5	5	3.306915E+03	5.750578E+01	9.152329E+00	1.000000E+00	3.306915E+03
6	6	4.264693E+03	6.530462E+01	1.039355E+01	1.000000E+00	4.264693E+03
7	7	4.499568E+03	6.707882E+01	1.067593E+01	1.000000E+00	4.499568E+03
8	8	5.386103E+03	7.339007E+01	1.168039E+01	1.000000E+00	5.386103E+03
9	9	6.096334E+03	7.807902E+01	1.242666E+01	1.000000E+00	6.096334E+03
10	10	6.164865E+03	7.851665E+01	1.24963 1E+01	1.000000E+00	6.164865E+03
11	11	6.830476E+03	8.264670E+01	1.315363E+01	1.000000E+00	6.830476E+03
12	12	7.027668E+03	8.383119E+01	1.334215E+01	1.000000E+00	7.027668E+03
13	13	8.952382E+03	9.461703E+01	1.505877E+01	1.000000E+00	8.952382E+03
14	14	9.890195E+03	9.944946E+01	1.582787E+01	1.000000E+00	9.890195E+03
15	15	1.110395E+04	1.053753E+02	1.677100E+01	1.000000E+00	1.110395E+04
16	16	1.190722E+04	1.091202E+02	1.736702E+01	1.000000E+00	1.190722E+04
17	17	1.208847E+04	1.099476E+02	1.749870E+01	1.000000E+00	1.208847E+04
18	18	1.246227E+04	1.116345E+02	1.776719E+01	1.000000E+00	1.246227E+04
19	19	1.318342E+04	1.148191E+02	1.827403E+01	1.000000E+00	1.318342E+04
20	20	1.374120E+04	1.172229E+02	1.865660E+01	1.000000E+00	1.374120E+04
21	21	1.477115E+04	1.215366E+02	1.934316E+01	1.000000E+00	1.477115E+04
22	22	1.543843E+04	1.242515E+02	1.977523E+01	1.000000E+00	1.543843E+04
23	23	1.597018E+04	1.263732E+02	2.011292E+01	1.000000E+00	1.597018E+04
24	24	1.598000E+04	1.264120E+02	2.011910E+01	1.000000E+00	1.598000E+04
25	25	1.772285E+04	1.331272E+02	2.118785E+01	1.000000E+00	1.772285E+04
26	26	1.960996E+04	1.400356E+02	2.228735E+01	1.000000E+00	1.960996E+04
27	27	2.139803E+04	1.462807E+02	2.328129E+01	1.000000E+00	2.139803E+04
28	28	2.196001E+04	1.481891E+02	2.358503E+01	1.000000E+00	2.196001E+04
29	29	2.269534E+04	1.506497E+02	2.397665E+01	1.000000E+00	2.269534E+04
30	30	2.341021E+04	1.530039E+02	2.435133E+01	1.000000E+00	2.341021E+04

Quadro 6.2 - Modelo 1 - Autovalores e frequências naturais (continuação).

31	31	2.434007E+04	1,560130E+02	2,483025E+01	1.000000E+00	2,434007E+04
32	32	2.528039E+04	1,589981E+02	2,530533E+01	1.000000E+00	2,528039E+04
33	33	2.550853E+04	1,597139E+02	2,541926E+01	1.000000E+00	2,550853E+04
34	34	2.700436E+04	1.643300E+02	2,615394E+01	1.000000E+00	2,700436E+04
35	35	2.787327E+04	1,669529E+02	2,657138E+01	1.000000E+00	2,787327E+04
36	36	2.814208E+04	1.677560E+02	2,669920E+01	1,000000E+00	2,814208E+04
37	37	2.959850E+04	1.72042 1E+02	2,738136E+01	1,000000E+00	2,959850E+04
38	38	3.140725E+04	1.772209E+02	2.820558E+01	1,000000E+00	3.140725E+04
39	39	3.329770E+04	1.824766E+02	2,904205E+01	1,000000E+00	3.329770E+04
40	40	3.356932E+04	1.832193E+02	2.916026E+01	LOOOOOOE+OO	3.356932E+04
41	41	3.419638E+04	1,849226E+02	2.943135E+01	1,000000E+00	3.419638E+04
42	42	3.464902E+04	1,861425E+02	2.962550E+01	LOOOOOOE+OO	3.464902E+04
43	43	3.511447E+04	1.873885E+02	2.982381E+01	1,000000E+00	3.511447E+04
44	44	3.633171E+04	1.906088E+02	3.033633E+01	LOOOOOOE+OO	3.633171E+04
45	45	3.676543E+04	1.917431E+02	3.051687E+01	LOOOOOOE+OO	3.676543E+04
46	46	3.787488E+04	1,946147E+02	3.097389E+01	LOOOOOOE+OO	3.787488E+04
47	47	3.788445E+04	1,946393E+02	3.097780E+01	LOOOOOOE+OO	3.788445E+04
48	48	3.811416E+04	1.952285E+02	3,107158E+01	LOOOOOOE+OO	3,811416E+04
49	49	3.959522E+04	1,989855E+02	3,166952E+01	LOOOOOOE+OO	3,959522E+04
50	50	4.003193E+04	2,000798E+02	3.184369E+01	LOOOOOOE+OO	4,003193E+04
51	51	4.224975E+04	2.055474E+02	3,271389E+01	LOOOOOOE+OO	4,224975E+04
52	52	4.350989E+04	2.085902E+02	3,319817E+01	LOOOOOOE+OO	4,350989E+04
53	53	4.47908 1E+04	2.116384E+02	3,368330E+01	LOOOOOOE+OO	4,479081E+04
54	54	4.571751E+04	2.138165E+02	3,402996E+01	LOOOOOOE+OO	4,571751E+04
55	55	4.764179E+04	2.182700E+02	3,473875E+01	LOOOOOOE+OO	4,764179E+04
56	56	4.915806E+04	2.217162E+02	3,528723E+01	LOOOOOOE+OO	4,915806E+04
57	57	5.006153E+04	2,237443E+02	3,561002E+01	LOOOOOOE+OO	5,006153E+04
58	58	5,113698E+04	2,261349E+02	3,599048E+01	LOOOOOOE+OO	5,113698E+04
59	59	5.262070E+04	2.293920E+02	3,650887E+01	LOOOOOOE+OO	5,262070E+04
60	60	5.328715E+04	2.308401E+02	3.673934E+01	LOOOOOOE+OO	5,328715E+04
61	61	5.679782E+04	2,383229E+02	3,793027E+01	LOOOOOOE+OO	5,679782E+04
62	62	5.97401 1E+04	2.444179E+02	3,890032E+01	LOOOOOOE+OO	5,974011E+04
63	63	6.561532E+04	2.561549E+02	4,076832E+01	LOOOOOOE+OO	6,561532E+04
64	64	6.618713E+04	2,572686E+02	4,094557E+01	LOOOOOOE+OO	6,618713E+04
65	65	6.780140E+04	2.603870E+02	4,144188E+01	LOOOOOOE+OO	6,780140E+04
66	66	7.600507E+04	2.756902E+02	4,387745E+01	LOOOOOOE+OO	7,600507E+04
67	67	8.187327E+04	2.861350E+02	4,553981E+01	LOOOOOOE+OO	8,187327E+04
68	68	8.196145E+04	2,862891E+02	4,556433E+01	LOOOOOOE+OO	8,196145E+04
69	69	8.482026E+04	2,912392E+02	4.635215E+01	LOOOOOOE+OO	8,482026E+04
70	70	8.520962E+04	2,919069E+02	4,645842E+01	LOOOOOOE+OO	8,520962E+04
71	71	8.697442E+04	2,949143E+02	4.693706E+01	LOOOOOOE+OO	8,697442E+04
72	72	8.810724E+04	2.968286E+02	4.724174E+01	LOOOOOOE+OO	8,810724E+04
73	73	8.905982E+04	2,984289E+02	4.749644E+01	LOOOOOOE+OO	8,905982E+04
74	74	9.219161E+04	3,036307E+02	4.832433E+01	LOOOOOOE+OO	9,219161E+04
75	75	9.570088E+04	3,093556E+02	4.923547E+01	LOOOOOOE+OO	9,570088E+04
76	76	9.663146E+04	3.108560E+02	4.947427E+01	LOOOOOOE+OO	9,663146E+04
77	77	1,061477E+05	3.258031E+02	5,185318E+01	LOOOOOOE+OO	1,061477E+05
78	78	1,077669E+05	3.282787E+02	5,224719E+01	LOOOOOOE+OO	1,077669E+05
79	79	1.105242E+05	3.324518E+02	5,291134E+01	LOOOOOOE+OO	1,105242E+05
80	80	1.130366E+05	3.362091E+02	5,350934E+01	LOOOOOOE+OO	1,130366E+05
81	81	1.176508E+05	3.430026E+02	5,459056E+01	LOOOOOOE+OO	1,176508E+05
82	82	1.235863E+05	3.515485E+02	5,595068E+01	LOOOOOOE+OO	1,235863E+05
83	83	1,261965E+05	3.552414E+02	5,653843E+01	LOOOOOOE+OO	1,261965E+05
84	84	1,317703E+05	3.630018E+02	5,777354E+01	LOOOOOOE+OO	1,317703E+05
85	85	1,337706E+05	3.657466E+02	5,821038E+01	LOOOOOOE+OO	1,337706E+05
86	86	1.375635E+05	3.708956E+02	5.902987E+01	LOOOOOOE+OO	1,375635E+05
87	87	1,421434E+05	3,770190E+02	6,000444E+01	LOOOOOOE+OO	1,421434E+05
88	88	1.462470E+05	3,824225E+02	6.086443E+01	LOOOOOOE+OO	1,462470E+05
89	89	1,485753E+05	3,854547E+02	6.134702E+01	LOOOOOOE+OO	1,485753E+05
90	90	1,518957E+05	3.897381E+02	6,202874E+01	LOOOOOOE+OO	1,518957E+05
91	91	1,573604E+05	3,966868E+02	6.313466E+01	LOOOOOOE+OO	1,573604E+05
92	92	1,611578E+05	4.014447E+02	6.389191E+01	LOOOOOOE+OO	1,611578E+05
93	93	1.687325E+05	4.107706E+02	6.537618E+01	LOOOOOOE+OO	1,687325E+05

Quadro 6.2 - Modelo 1 - Autovalores e frequências naturais (continuação).

94	94	1.68803 IE+05	4.108565E+02	6.538985E+01	1.000000E+00	1.688031E+05
95	95	1.849651E+05	4.300757E+02	6.844868E+01	1.000000E+00	1.849651E+05
96	96	1.916022E+05	4.377239E+02	6.966592E-K)1	1.000000E+00	1.916022E+05
97	97	1.976273E+05	4.445529E+02	7.075280E+01	1.000000E+00	1.976273E+05
98	98	2.125202E+05	4.609992E+02	7.337030E+01	1.000000E+00	2.125202E+05
99	99	2.185154E+05	4.674563E+02	7.439799E+01	1.000000E+00	2.185154E+05
1	*** END OF JOB ***					

Quadro 6.3 - Modelo 2 - Autovalores e frequências naturais.

1 MSC/NASTRAN - M0DEL02 -	MARCH 28, 1995 MSC/NASTRAN 2/18/93
PAGE 42	
MODOS NATURAIS - METODO DE LANCZOS	
OTHER ARE 760 POINTS DIVIDED INTO 1 GROUP(S).	
OELEMENT TYPE NUMBER ASSEMBLY TIME(SEC)	
ELAS2 168 0.03	
BAR 147 0.24	
HEXA 298 2.71	
PENTA 6 0.05	
TOTAL MATRIX ASSEMBLY TIME FOR INITIAL PROBLEM SPECIFICATION	619 ELEMENTS IS 3.03 SECONDS.
DEGREES OF FREEDOM = 2352	MESSAGE LEVEL = 1 LEFT END POINT = -
1.806E-0001	
END OF LANCZOS RUN	
COMPLETION FLAG = 0	
NO. OF MODES COMPUTED = 118	
EIGENVALUE ANALYSIS SUMMARY (LANCZOS ITERATION)	
BLOCK SIZE USED..... 7	
NUMBER OF DECOMPOSITIONS..... 3	
NUMBER OF ROOTS FOUND..... 118	
NUMBER OF SOLVES REQUIRED..... 34	
TERMINATION MESSAGE : REQUIRED NUMBER OF EIGENVALUES FOUND.	
REAL EIGENVALUES	
1 MSC/NASTRAN - M0DEL02 -	MARCH 28, 1995 MSC/NASTRAN 2/18/93
PAGE 42	
MODOS NATURAIS - METODO DE LANCZOS	
0 ANALISE	
OTHER ARE 760 POINTS DIVIDED INTO 1 GROUP(S)	
OELEMENT TYPE NUMBER ASSEMBLY TIME(SEC)	
ELAS2 168 0.03	
BAR 147 0.24	
HEXA 298 2.71	
PENTA 6 0.05	
TOTAL MATRIX ASSEMBLY TIME FOR INITIAL PROBLEM SPECIFICATION	619 ELEMENTS IS 3.03 SECONDS.
DEGREES OF FREEDOM = 2352	MESSAGE LEVEL = 1 LEFT END POINT = -
1.806E-0001	
END OF LANCZOS RUN	
COMPLETION FLAG = 0	
NO. OF MODES COMPUTED = 118	
EIGENVALUE ANALYSIS SUMMARY (LANCZOS ITERATION)	
BLOCK SIZE USED..... 7	

Quadro 6.3 - Modelo 2 - Autovalores e frequências naturais (continuação).

NUMBER OF DECOMPOSITIONS..... 3						
NUMBER OF ROOTS FOUND..... 118						
NUMBER OF SOLVES REQUIRED..... 34						
TERMINATION MESSAGE : REQUIRED NUMBER OF EIGENVALUES FOUND.						
R E A L E I G E N V A L U E S						
MODE NO.	ORDER	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES GENERALIZED	MASS	GENERALIZED STIFFNESS
1	1	8.528576E+01	9.235029E+00	1.469800E+00	1.000000E+00	8.528576E+01
2	2	1.751167E+02	1.323317E+01	2.106124E+00	1.000000E+00	1.751167E+02
3	3	2.721037E+02	1.649557E+01	2.625351E+00	1.000000E+00	2.721037E+02
4	4	1.922144E+03	4.384227E+01	6.977713E+00	1.000000E+00	1.922144E+03
5	5	3.220296E+03	5.674765E+01	9.031669E+00	1.000000E+00	3.220296E+03
6	6	4.044903E+03	6.359955E+01	1.012218E+01	1.000000E+00	4.044903E+03
7	7	4.253590E+03	6.521955E+01	1.038001E+01	1.000000E+00	4.253590E+03
8	8	5.247455E+03	7.243932E+01	1.152908E+01	1.000000E+00	5.247455E+03
9	9	5.600466E+03	7.483626E+01	1.191056E+01	1.000000E+00	5.600466E+03
10	10	5.709450E+03	7.556091E+01	1.202589E+01	1.000000E+00	5.709450E+03
11	11	6.523221E+03	8.076646E+01	1.285438E+01	1.000000E+00	6.523221E+03
12	12	6.736233E+03	8.207456E+01	1.306257E+01	1.000000E+00	6.736233E+03
13	13	7.41461 1E+03	8.610814E+01	1.370454E+01	1.000000E+00	7.41461 1E+03
14	14	7.730158E+03	8.792132E+01	1.39931 1E+01	1.000000E+00	7.730158E+03
15	15	8.184439E+03	9.046789E+01	1.43984 1E+01	1.000000E+00	8.184439E+03
16	16	8.876270E+03	9.421396E+01	1.499462E+01	1.000000E+00	8.876270E+03
17	17	9.197099E+03	9.590151E+01	1.526320E+01	1.000000E+00	9.197099E+03
18	18	9.814905E+03	9.907020E+01	1.576751E+01	1.000000E+00	9.814905E+03
19	19	1.011955E+04	1.005960E+02	1.601035E+01	1.000000E+00	1.011955E+04
20	20	1.049867E+04	1.024630E+02	1.630750E+01	1.000000E+00	1.049867E+04
21	21	1.064126E+04	1.031565E+02	1.641786E+01	1.000000E+00	1.064126E+04
22	22	1.073510E+04	1.036103E+02	1.649010E+01	1.000000E+00	1.073510E+04
23	23	1.133725E+04	1.064765E+02	1.694626E+01	1.000000E+00	1.133725E+04
24	24	1.157673E+04	1.075952E+02	1.712431E+01	1.000000E+00	1.157673E+04
25	25	1.255287E+04	1.120396E+02	1.783165E+01	1.000000E+00	1.255287E+04
26	26	1.272911E+04	1.128233E+02	1.795639E+01	1.000000E+00	1.272911E+04
27	27	1.340109E+04	1.157631E+02	1.842427E+01	1.000000E+00	1.340109E+04
28	28	1.493924E+04	1.222262E+02	1.945290E+01	1.000000E+00	1.493924E+04
29	29	1.580968E+04	1.257365E+02	2.001159E+01	1.000000E+00	1.580968E+04
30	30	1.606105E+04	1.267322E+02	2.017006E+01	1.000000E+00	1.606105E+04
31	31	1.695199E+04	1.301998E+02	2.072194E+01	1.000000E+00	1.695199E+04
32	32	1.823548E+04	1.350388E+02	2.149209E+01	1.000000E+00	1.823548E+04
33	33	1.911816E+04	1.382684E+02	2.200610E+01	1.000000E+00	1.911816E+04
34	34	2.054827E+04	1.433467E+02	2.281433E+01	1.000000E+00	2.054827E+04
35	35	2.255038E+04	1.501678E+02	2.389995E+01	1.000000E+00	2.255038E+04
36	36	2.272117E+04	1.507354E+02	2.399029E+01	1.000000E+00	2.272117E+04
37	37	2.314187E+04	1.521245E+02	2.421137E+01	1.000000E+00	2.314187E+04
38	38	2.427865E+04	1.558161E+02	2.479890E+01	1.000000E+00	2.427865E+04
39	39	2.572225E+04	1.603816E+02	2.552552E+01	1.000000E+00	2.572225E+04
40	40	2.577741E+04	1.605534E+02	2.555287E+01	1.000000E+00	2.577741E+04
41	41	2.748814E+04	1.657955E+02	2.638717E+01	1.000000E+00	2.748814E+04
42	42	2.762865E+04	1.662187E+02	2.645452E+01	1.000000E+00	2.762865E+04
43	43	2.985953E+04	1.727991E+02	2.750183E+01	1.000000E+00	2.985953E+04
44	44	3.047886E+04	1.745820E+02	2.778558E+01	1.000000E+00	3.047886E+04
45	45	3.070725E+04	1.752349E+02	2.788949E+01	1.000000E+00	3.070725E+04
46	46	3.112249E+04	1.764157E+02	2.807743E+01	1.000000E+00	3.112249E+04
47	47	3.211046E+04	1.791939E+02	2.851960E+01	1.000000E+00	3.211046E+04
48	48	3.273472E+04	1.809274E+02	2.879549E+01	1.000000E+00	3.273472E+04
49	49	3.316069E+04	1.821008E+02	2.898224E+01	1.000000E+00	3.316069E+04
50	50	3.397578E+04	1.843252E+02	2.933626E+01	1.000000E+00	3.397578E+04
51	51	3.509723E+04	1.873426E+02	2.981649E+01	1.000000E+00	3.509723E+04
52	52	3.527893E+04	1.878269E+02	2.989357E+01	1.000000E+00	3.527893E+04
53	53	3.559112E+04	1.886561E+02	3.002555E+01	1.000000E+00	3.559112E+04
54	54	3.613054E+04	1.900803E+02	3.025223E+01	1.000000E+00	3.613054E+04
55	55	3.698335E+04	1.923106E+02	3.060718E+01	1.000000E+00	3.698335E+04
56	56	3.754847E+04	1.937743E+02	3.084013E+01	1.000000E+00	3.754847E+04
57	57	3.814960E+04	1.953192E+02	3.108602E+01	1.000000E+00	3.814960E+04

Quadro 6.3 - Modelo 2 - Autovalores e frequências naturais. (Continuação)

58	58	3.965567E+04	1.991373E+02	3.169369E+01	1.000000E+00	3.965567E+04
59	59	4.025364E+04	2.006331E+02	3.193175E+01	1.000000E+00	4.025364E+04
60	60	4.062125E+04	2.015471E+02	3.207722E+01	1.000000E+00	4.062125E+04
61	61	4.354544E+04	2.086754E+02	3.321173E+01	1.000000E+00	4.354544E+04
62	62	4.484265E+04	2.117608E+02	3.370278E+01	1.000000E+00	4.484265E+04
63	63	4.680697E+04	2.163492E+02	3.443304E+01	1.000000E+00	4.680697E+04
64	64	4.902877E+04	2.214244E+02	3.524079E+01	1.000000E+00	4.902877E+04
65	65	4.961529E+04	2.227449E+02	3.545095E+01	1.000000E+00	4.961529E+04
66	66	4.967229E+04	2.228728E+02	3.547131E+01	1.000000E+00	4.967229E+04
67	67	5.169155E+04	2.273578E+02	3.618511E+01	1.000000E+00	5.169155E+04
68	68	5.344414E+04	2.311799E+02	3.679342E+01	1.000000E+00	5.344414E+04
69	69	5.644706E+04	2.375859E+02	3.781297E+01	1.000000E+00	5.644706E+04
70	70	5.826161E+04	2.413744E+02	3.841593E+01	1.000000E+00	5.826161E+04
71	71	6.008854E+04	2.451296E+02	3.901359E+01	1.000000E+00	6.008854E+04
72	72	6.219707E+04	2.493934E+02	3.969219E+01	1.000000E+00	6.219707E+04
73	73	6.243547E+04	2.498709E+02	3.976819E+01	1.000000E+00	6.243547E+04
74	74	6.566027E+04	2.562426E+02	4.078228E+01	1.000000E+00	6.566027E+04
75	75	6.967704E+04	2.639641E+02	4.201119E+01	1.000000E+00	6.967704E+04
76	76	7.380691E+04	2.716743E+02	4.323830E+01	1.000000E+00	7.380691E+04
77	77	7.549487E+04	2.747633E+02	4.372994E+01	1.000000E+00	7.549487E+04
78	78	7.646638E+04	2.765256E+02	4.401041E+01	1.000000E+00	7.646638E+04
79	79	7.758888E+04	2.785478E+02	4.433226E+01	1.000000E+00	7.758888E+04
80	80	8.066182E+04	2.840103E+02	4.520164E+01	1.000000E+00	8.066182E+04
81	81	8.268439E+04	2.875489E+02	4.576484E+01	1.000000E+00	8.268439E+04
82	82	8.445182E+04	2.906060E+02	4.625137E+01	1.000000E+00	8.445182E+04
83	83	8.483605E+04	2.912663E+02	4.635647E+01	1.000000E+00	8.483605E+04
84	84	8.660291E+04	2.942837E+02	4.683671E+01	1.000000E+00	8.660291E+04
85	85	8.787951E+04	2.964448E+02	4.718065E+01	1.000000E+00	8.787951E+04
86	86	9.238933E+04	3.039561E+02	4.837612E+01	1.000000E+00	9.238933E+04
87	87	9.310149E+04	3.051254E+02	4.856221E+01	1.000000E+00	9.310149E+04
88	88	9.421559E+04	3.069456E+02	4.885191E+01	1.000000E+00	9.421559E+04
89	89	9.797444E+04	3.130087E+02	4.981688E+01	1.000000E+00	9.797444E+04
90	90	1.031785E+05	3.212141E+02	5.112280E+01	1.000000E+00	1.031785E+05
91	91	1.038666E+05	3.222834E+02	5.129299E+01	1.000000E+00	1.038666E+05
92	92	1.081042E+05	3.287920E+02	5.232888E+01	1.000000E+00	1.081042E+05
93	93	1.095595E+05	3.309978E+02	5.267994E+01	1.000000E+00	1.095595E+05
94	94	1.167208E+05	3.416442E+02	5.437437E+01	1.000000E+00	1.167208E+05
95	95	1.223088E+05	3.497268E+02	5.566074E+01	1.000000E+00	1.223088E+05
96	96	1.243761E+05	3.526700E+02	5.612917E+01	1.000000E+00	1.243761E+05
97	97	1.257044E+05	3.545482E+02	5.642810E+01	1.000000E+00	1.257044E+05
98	98	1.274869E+05	3.570531E+02	5.682676E+01	1.000000E+00	1.274869E+05
99	99	1.286467E+05	3.586736E+02	5.708467E+01	1.000000E+00	1.286467E+05
100	100	1.363026E+05	3.691918E+02	5.875869E+01	1.000000E+00	1.363026E+05
101	101	1.394218E+05	3.733923E+02	5.942722E+01	1.000000E+00	1.394218E+05
102	102	1.400758E+05	3.742671E+02	5.956645E+01	1.000000E+00	1.400758E+05
103	103	1.468001E+05	3.831450E+02	6.097943E+01	1.000000E+00	1.468001E+05
104	104	1.503799E+05	3.877885E+02	6.171845E+01	1.000000E+00	1.503799E+05
105	105	1.569656E+05	3.961889E+02	6.305542E+01	1.000000E+00	1.569656E+05
106	106	1.604072E+05	4.005087E+02	6.374294E+01	1.000000E+00	1.604072E+05
107	107	1.649253E+05	4.061100E+02	6.463441E+01	1.000000E+00	1.649253E+05
108	108	1.673933E+05	4.091373E+02	6.511623E+01	1.000000E+00	1.673933E+05
109	109	1.691720E+05	4.113053E+02	6.546127E+01	1.000000E+00	1.691720E+05
110	110	1.740765E+05	4.172248E+02	6.640339E+01	1.000000E+00	1.740765E+05
111	111	1.809710E+05	4.254069E+02	6.770561E+01	1.000000E+00	1.809710E+05
112	112	1.846152E+05	4.296687E+02	6.838389E+01	1.000000E+00	1.846152E+05
113	113	1.922205E+05	4.384296E+02	6.977823E+01	1.000000E+00	1.922205E+05
114	114	1.969629E+05	4.438050E+02	7.063376E+01	1.000000E+00	1.969629E+05
115	115	1.999670E+05	4.471767E+02	7.117039E+01	1.000000E+00	1.999670E+05
116	116	2.049504E+05	4.527144E+02	7.205174E+01	1.000000E+00	2.049504E+05
117	117	2.085289E+05	4.566497E+02	7.267805E+01	1.000000E+00	2.085289E+05
118	118	2.194125E+05	4.684148E+02	7.455054E+01	1.000000E+00	2.194125E+05

1 MSC/NASTRAN - M0DEL02 -

MARCH 28, 1995 MSC/NASTRAN 2/18/93

1 *** END OF JOB ***

Quadro 6.4 - Modelo 3- Autovalores e frequências naturais.

1 MODELO 3 - COM ELEMENTOS TETRAEDRICOS QUADRATICOS

JUNE 7,1995

MSC/NASTRAN 2/18/93 PAGE 524

DEGREES OF FREEDOM = 25767

MAX. BLOCK STEPS = 100

MAX. S.O. VECTORS = 500

MAX. MODES = 500

WORKSPACE USED = 863237

END OF LANCZOS RUN

COMPLETION FLAG = 0

NO. OF MODES COMPUTED = 131

BLOCK SIZE USED..... 7

NUMBER OF DECOMPOSITIONS..... 3

NUMBER OF ROOTS FOUND..... 131

NUMBER OF SOLVES REQUIRED..... 63

TERMINATION MESSAGE : REQUIRED NUMBER OF EIGENVALUES FOUND.

REAL EIGENVALUES

MODE NO.	ORDER	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
1	1	1.181187E+02	1.086824E+01	1.729734E+00	1.000000E+00	1.181187E+02
2	2	2.025216E+02	1.423101E+01	2.264935E+00	1.000000E+00	2.025216E+02
3	3	3.239887E+02	1.799969E+01	2.864739E+00	1.000000E+00	3.239887E+02
4	4	2.698619E+03	5.194823E+01	8.267818E+00	1.000000E+00	2.698619E+03
5	5	4.165868E+03	6.454354E+01	1.027242E+01	1.000000E+00	4.165868E+03
6	6	5.372196E+03	7.329527E+01	1.166530E+01	1.000000E+00	5.372196E+03
7	7	5.659325E+03	7.522848E+01	1.197298E+01	1.000000E+00	5.659325E+03
8	8 ■	6.494863E+03	8.059071E+01	1.282641E+01	1.000000E+00	6.494863E+03
9	9	6.562760E+03	8.101087E+01	1.289328E+01	1.000000E+00	6.562760E+03
10	10	7.136199E+03	8.447603E+01	1.344478E+01	1.000000E+00	7.136199E+03
11	11	7.451909E+03	8.632444E+01	1.373896E+01	1.000000E+00	7.451909E+03
12	12	7.640414E+03	8.740946E+01	1.391165E+01	1.000000E+00	7.640414E+03
13	13	8.028058E+03	8.959943E+01	1.426019E+01	1.000000E+00	8.028058E+03
14	14	8.246937E+03	9.081265E+01	1.445328E+01	1.000000E+00	8.246937E+03
15	15	8.464738E+03	9.200401E+01	1.464289E+01	1.000000E+00	8.464738E+03
16	16	9.227928E+03	9.606211E+01	1.528876E+01	1.000000E+00	9.227928E+03
17	17	1.003130E+04	1.001564E+02	1.594038E+01	1.000000E+00	1.003130E+04
18	18	1.031794E+04	1.015773E+02	1.616652E+01	1.000000E+00	1.031794E+04
19	19	1.070979E+04	1.034881E+02	1.647064E+01	1.000000E+00	1.070979E+04
20	20	1.159138E+04	1.076633E+02	1.713514E+01	1.000000E+00	1.159138E+04
21	21	1.228879E+04	1.108548E+02	1.764309E+01	1.000000E+00	1.228879E+04
22	22	1.254459E+04	1.120027E+02	1.782578E+01	1.000000E+00	1.254459E+04
23	23	1.280145E+04	1.131435E+02	1.800734E+01	1.000000E+00	1.280145E+04
24	24	1.378908E+04	1.174269E+02	1.868908E+01	1.000000E+00	1.378908E+04
25	25	1.414188E+04	1.189196E+02	1.892665E+01	1.000000E+00	1.414188E+04
26	26	1.514579E+04	1.230682E+02	1.958692E+01	1.000000E+00	1.514579E+04
27	27	1.548399E+04	1.244347E+02	1.980440E+01	1.000000E+00	1.548399E+04
28	28	1.609012E+04	1.268468E+02	2.018830E+01	1.000000E+00	1.609012E+04
29	29	1.692725E+04	1.301048E+02	2.070682E+01	1.000000E+00	1.692725E+04
30	30	1.754661E+04	1.324636E+02	2.108224E+01	1.000000E+00	1.754661E+04
31	31	1.832935E+04	1.353859E+02	2.154734E+01	1.000000E+00	1.832935E+04
32	32	1.874350E+04	1.369069E+02	2.178941E+01	1.000000E+00	1.874350E+04
33	33	1.896691E+04	1.377204E+02	2.191888E+01	1.000000E+00	1.896691E+04
34	34	2.044381E+04	1.429818E+02	2.275627E+01	1.000000E+00	2.044381E+04
35	35	2.061788E+04	1.435893E+02	2.285294E+01	1.000000E+00	2.061788E+04
36	36	2.372220E+04	1.540201E+02	2.451307E+01	1.000000E+00	2.372220E+04
37	37	2.389851E+04	1.545914E+02	2.460399E+01	1.000000E+00	2.389851E+04
38	38	2.472589E+04	1.572447E+02	2.502627E+01	1.000000E+00	2.472589E+04
39	39	2.512547E+04	1.585102E+02	2.522767E+01	1.000000E+00	2.512547E+04
40	40	2.546070E+04	1.595641E+02	2.539541E+01	1.000000E+00	2.546070E+04

Quadro 6.4 - Modelo 3- Autovalores e frequências naturais (continuação).

41	41	2.861634E+04	1.691636E+02	2.692323E+01	1.000000E+00	2.861634E+04
42	42	3.000162E+04	1.732098E+02	2.756719E+01	1.000000E+00	3.000162E+04
43	43	3.128324E+04	1.768707E+02	2.814984E+01	1.000000E+00	3.128324E+04
44	44	3.235692E+04	1.798803E+02	2.862884E+01	1.000000E+00	3.235692E+04
45	45	3.393072E+04	1.842029E+02	2.931681E+01	1.000000E+00	3.393072E+04
46	46	3.532182E+04	1.879410E+02	2.991174E+01	1.000000E+00	3.532182E+04
47	47	3.552250E+04	1.884741E+02	2.999659E+01	1.000000E+00	3.552250E+04
48	48	3.597610E+04	1.896737E+02	3.018750E+01	1.000000E+00	3.597610E+04
49	49	3.668518E+04	1.915337E+02	3.048354E+01	1.000000E+00	3.668518E+04
50	50	3.797499E+04	1.948717E+02	3.101480E+01	1.000000E+00	3.797499E+04
51	51	3.867316E+04	1.966549E+02	3.129860E+01	1.000000E+00	3.867316E+04
52	52	4.126509E+04	2.031381E+02	3.233043E+01	1.000000E+00	4.126509E+04
53	53	4.141726E+04	2.035123E+02	3.238999E+01	1.000000E+00	4.141726E+04
54	54	4.225127E+04	2.055511E+02	3.271448E+01	1.000000E+00	4.225127E+04
55	55	4.278315E+04	2.068409E+02	3.291975E+01	1.000000E+00	4.278315E+04
56	56	4.395081E+04	2.096445E+02	3.336596E+01	1.000000E+00	4.395081E+04
57	57	4.660941E+04	2.158921E+02	3.436030E+01	1.000000E+00	4.660941E+04
58	58	4.722848E+04	2.173211E+02	3.458773E+01	1.000000E+00	4.722848E+04
59	59	4.879523E+04	2.208964E+02	3.515676E+01	1.000000E+00	4.879523E+04
60	60	5.025364E+04	2.241732E+02	3.567828E+01	1.000000E+00	5.025364E+04
61	61	5.304397E+04	2.303128E+02	3.665542E+01	1.000000E+00	5.304397E+04
62	62	5.564304E+04	2.358878E+02	3.754270E+01	1.000000E+00	5.564304E+04
63	63	5.610304E+04	2.368608E+02	3.769757E+01	1.000000E+00	5.610304E+04
64	64	5.643831E+04	2.375675E+02	3.781004E+01	1.000000E+00	5.643831E+04
65	65	5.708296E+04	2.389204E+02	3.802536E+01	1.000000E+00	5.708296E+04
66	66	6.106312E+04	2.471095E+02	3.932870E+01	1.000000E+00	6.106312E+04
67	67	6.307594E+04	2.511492E+02	3.997164E+01	1.000000E+00	6.307594E+04
68	68	6.370673E+04	2.524019E+02	4.017101E+01	1.000000E+00	6.370673E+04
69	69	6.459110E+04	2.541478E+02	4.044888E+01	1.000000E+00	6.459110E+04
70	70	6.956190E+04	2.637459E+02	4.197646E+01	1.000000E+00	6.956190E+04
71	71	7.105427E+04	2.665601E+02	4.242435E+01	1.000000E+00	7.105427E+04
72	72	7.155434E+04	2.674964E+02	4.257338E+01	1.000000E+00	7.155434E+04
73	73	7.599059E+04	2.756639E+02	4.387327E+01	1.000000E+00	7.599059E+04
74	74	7.628840E+04	2.762035E+02	4.395916E+01	1.000000E+00	7.628840E+04
75	75	8.161223E+04	2.856785E+02	4.546715E+01	1.000000E+00	8.161223E+04
76	76	8.628139E+04	2.937369E+02	4.674969E+01	1.000000E+00	8.628139E+04
77	77	8.826029E+04	2.970863E+02	4.728276E+01	1.000000E+00	8.826029E+04
78	78	8.993355E+04	2.998892E+02	4.772885E+01	1.000000E+00	8.993355E+04
79	79	9.253566E+04	3.041967E+02	4.841442E+01	1.000000E+00	9.253566E+04
80	80	9.581377E+04	3.095380E+02	4.926450E+01	1.000000E+00	9.581377E+04
81	81	9.599339E+04	3.098280E+02	4.931066E+01	1.000000E+00	9.599339E+04
82	82	9.940722E+04	3.152891E+02	5.017982E+01	1.000000E+00	9.940722E+04
83	83	9.984820E+04	3.159877E+02	5.029100E+01	1.000000E+00	9.984820E+04
84	84	1.020240E+05	3.194119E+02	5.083599E+01	1.000000E+00	1.020240E+05
85	85	1.021565E+05	3.196193E+02	5.086899E+01	1.000000E+00	1.021565E+05
86	86	1.041718E+05	3.227566E+02	5.136831E+01	1.000000E+00	1.041718E+05
87	87	1.048019E+05	3.237312E+02	5.152343E+01	1.000000E+00	1.048019E+05
88	88	1.087124E+05	3.297157E+02	5.247588E+01	1.000000E+00	1.087124E+05
89	89	1.095107E+05	3.309240E+02	5.266818E+01	1.000000E+00	1.095107E+05
90	90	1.113791E+05	3.337351E+02	5.311560E+01	1.000000E+00	1.113791E+05
91	91	1.153957E+05	3.396994E+02	5.406484E+01	1.000000E+00	1.153957E+05
92	92	1.154297E+05	3.397495E+02	5.407281E+01	1.000000E+00	1.154297E+05
93	93	1.164638E+05	3.412679E+02	5.431448E+01	1.000000E+00	1.164638E+05
94	94	1.224702E+05	3.499574E+02	5.569746E+01	1.000000E+00	1.224702E+05
95	95	1.239391E+05	3.520498E+02	5.603047E+01	1.000000E+00	1.239391E+05
96	96	1.249575E+05	3.534932E+02	5.626019E+01	1.000000E+00	1.249575E+05
97	97	1.262595E+05	3.553301E+02	5.655254E+01	1.000000E+00	1.262595E+05
98	98	1.286488E+05	3.586765E+02	5.708513E+01	1.000000E+00	1.286488E+05
99	99	1.294449E+05	3.597845E+02	5.726148E+01	1.000000E+00	1.294449E+05
100	100	1.310185E+05	3.619648E+02	5.760849E+01	1.000000E+00	1.310185E+05
101	101	1.320111E+05	3.633333E+02	5.782629E+01	1.000000E+00	1.320111E+05
102	102	1.336420E+05	3.655707E+02	5.818239E+01	1.000000E+00	1.336420E+05
103	103	1.362124E+05	3.690696E+02	5.873925E+01	1.000000E+00	1.362124E+05
104	104	1.378592E+05	3.712939E+02	5.909326E+01	1.000000E+00	1.378592E+05
105	105	1.399739E+05	3.741308E+02	5.954477E+01	1.000000E+00	1.399739E+05

Quadro 6.4 - Modelo 3- Autovalores e frequências naturais (continuação).

106	106	1.434557E+05	3.787555E+02	6.028080E+01	1.000000E+00	1.434557E+05
107	107	1.452560E+05	3.811247E+02	6.065787E+01	1.000000E+00	1.452560E+05
108	108	1.465410E+05	3.828068E+02	6.092559E+01	1.000000E+00	1.465410E+05
109	109	1.482049E+05	3.849740E+02	6.127051E+01	1.000000E+00	1.482049E+05
110	110	1.513117E+05	3.889880E+02	6.190936E+01	1.000000E+00	1.513117E+05
111	111	1.545420E+05	3.931184E+02	6.256673E+01	1.000000E+00	1.545420E+05
112	112	1.549496E+05	3.936364E+02	6.264918E+01	1.000000E+00	1.549496E+05
113	113	1.589687E+05	3.987088E+02	6.345648E+01	1.000000E+00	1.589687E+05
114	114	1.682102E+05	4.101344E+02	6.527491E+01	1.000000E+00	1.682102E+05
115	115	1.688799E+05	4.109500E+02	6.540473E+01	1.000000E+00	1.688799E+05
116	116	1.698664E+05	4.121485E+02	6.559547E+01	1.000000E+00	1.698664E+05
117	117	1.703829E+05	4.127746E+02	6.569512E+01	1.000000E+00	1.703829E+05
118	118	1.736652E+05	4.167316E+02	6.632489E+01	1.000000E+00	1.736652E+05
119	119	1.759250E+05	4.194341E+02	6.675502E+01	1.000000E+00	1.759250E+05
120	120	1.793068E+05	4.234463E+02	6.739357E+01	1.000000E+00	1.793068E+05
121	121	1.826015E+05	4.273190E+02	6.800993E+01	1.000000E+00	1.826015E+05
122	122	1.859597E+05	4.312305E+02	6.863246E+01	1.000000E+00	1.859597E+05
123	123	1.892923E+05	4.350773E+02	6.924471E+01	1.000000E+00	1.892923E+05
124	124	1.936837E+05	4.400951E+02	7.004331E+01	1.000000E+00	1.936837E+05
125	125	1.978142E+05	4.447631E+02	7.078624E+01	1.000000E+00	1.978142E+05
126	126	2.004020E+05	4.476628E+02	7.124774E+01	1.000000E+00	2.004020E+05
127	127	2.036890E+05	4.513192E+02	7.182968E+01	1.000000E+00	2.036890E+05
128	128	2.063888E+05	4.543003E+02	7.230414E+01	1.000000E+00	2.063888E+05
129	129	2.078867E+05	4.559459E+02	7.256604E+01	1.000000E+00	2.078867E+05
130	130	2.130003E+05	4.615195E+02	7.345312E+01	1.000000E+00	2.130003E+05
131	131	2.172908E+05	4.661446E+02	7.418922E+01	1.000000E+00	2.172908E+05

1 MODELO 3 - COM ELEMENTOS TETRAEDRICOS QUADRATICOS JUNE 7,1995
MSC/NASTRAN 2/18/93 PAGE 530

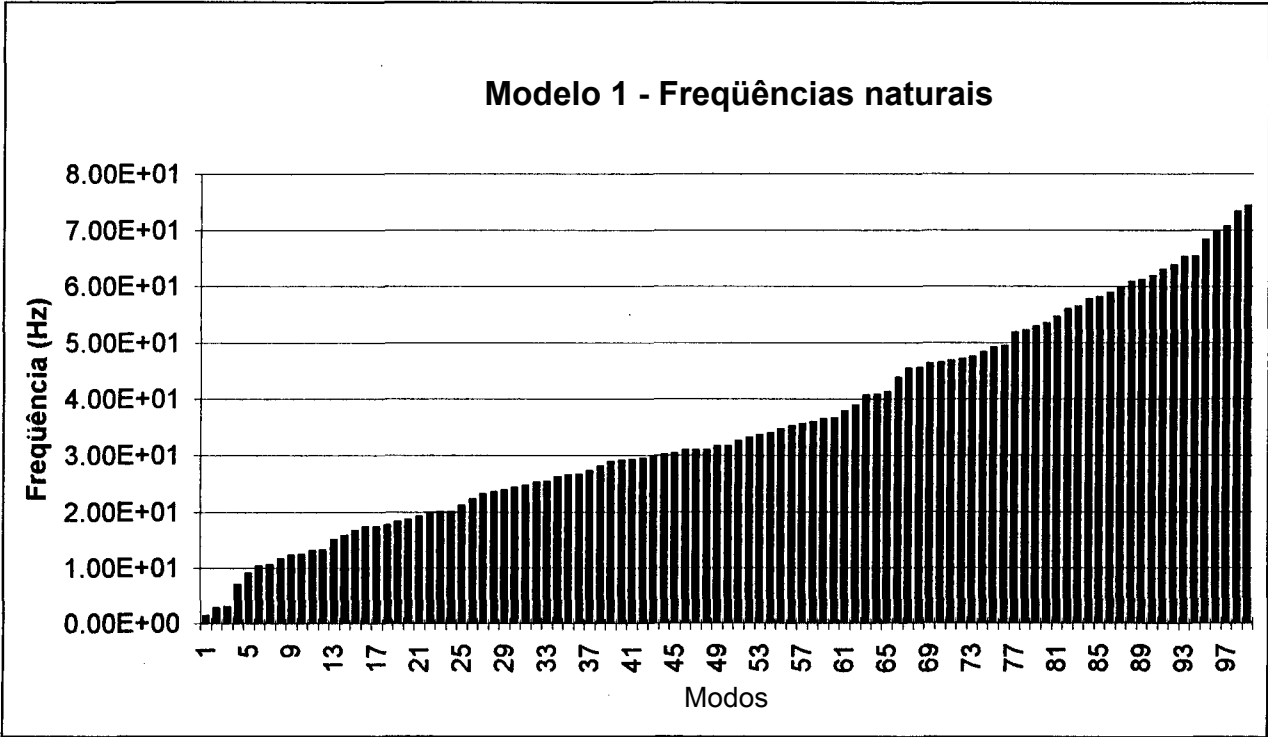


Figura 6.1 - Modelo 1 - Gráfico das frequências naturais

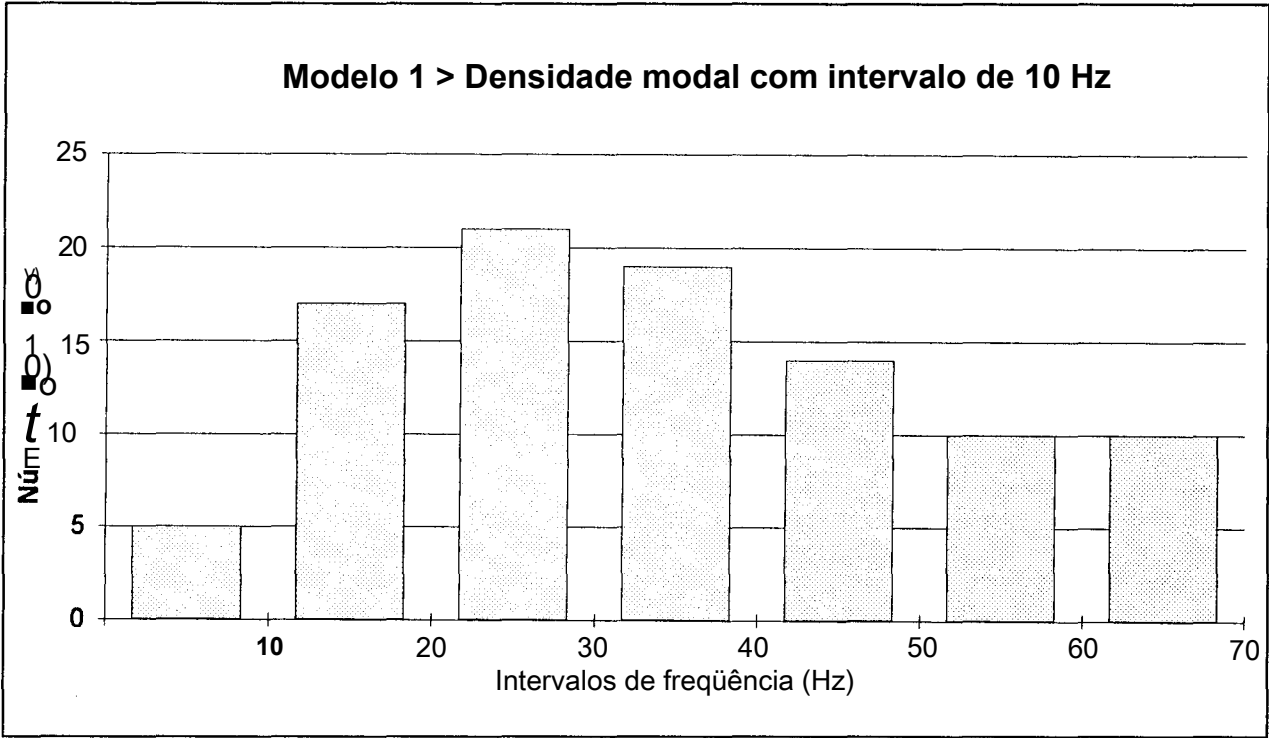


Figura 6.2- IVlodelo 1 - Gráfico das densidades mcxJais com intervalo de 10 Hz

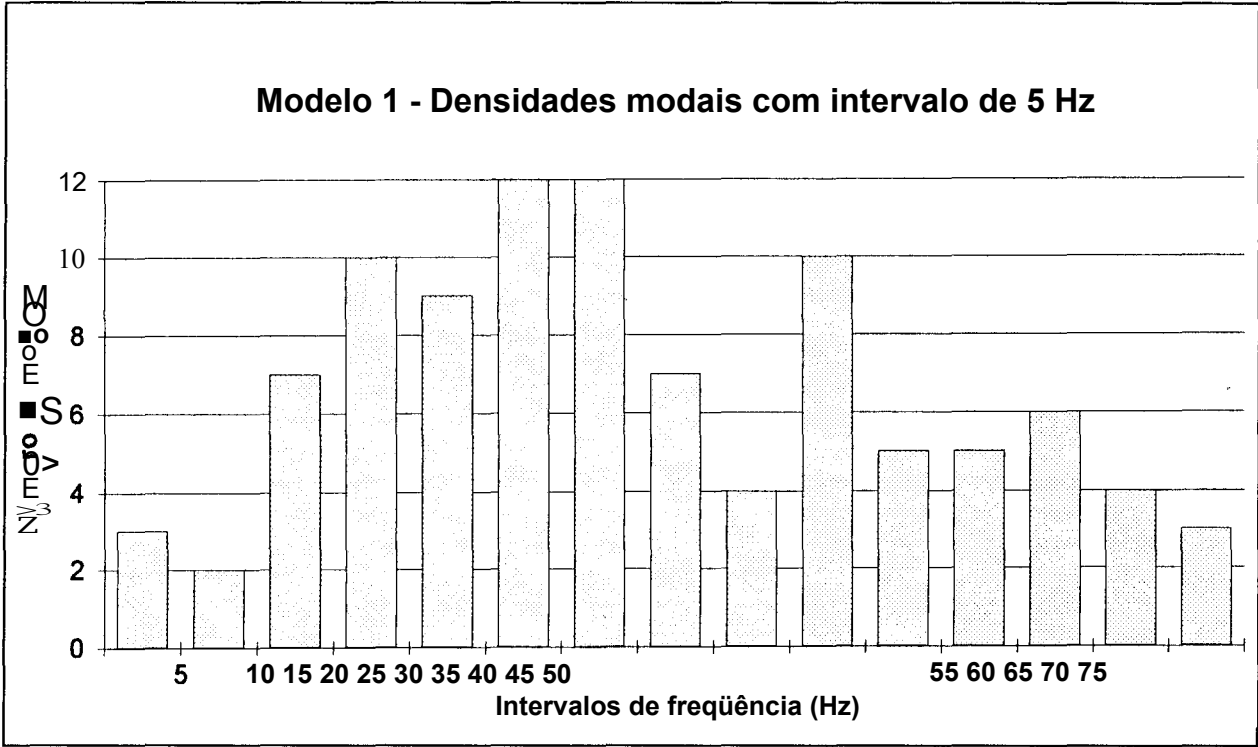


Figura 6.3- Modelo 1 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 5 Hz

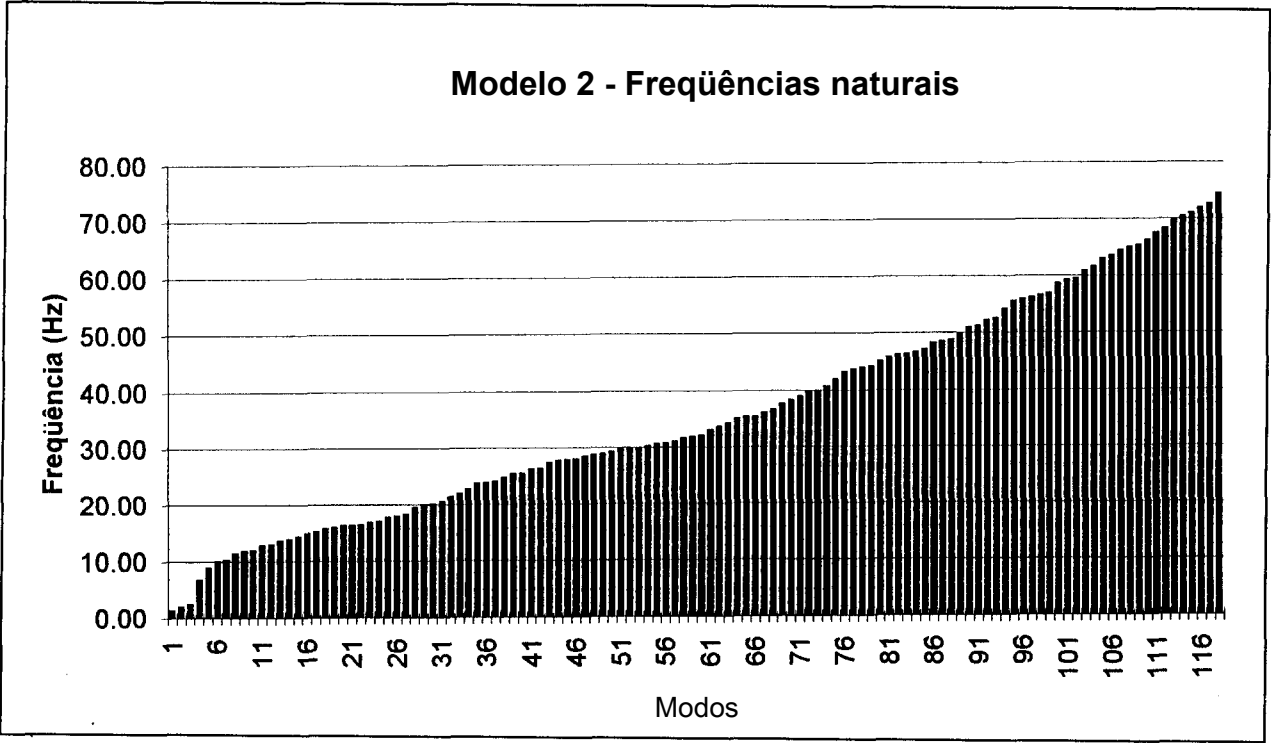


Figura 6.4 - Modelo 2 - Gráfico das freqüências naturais

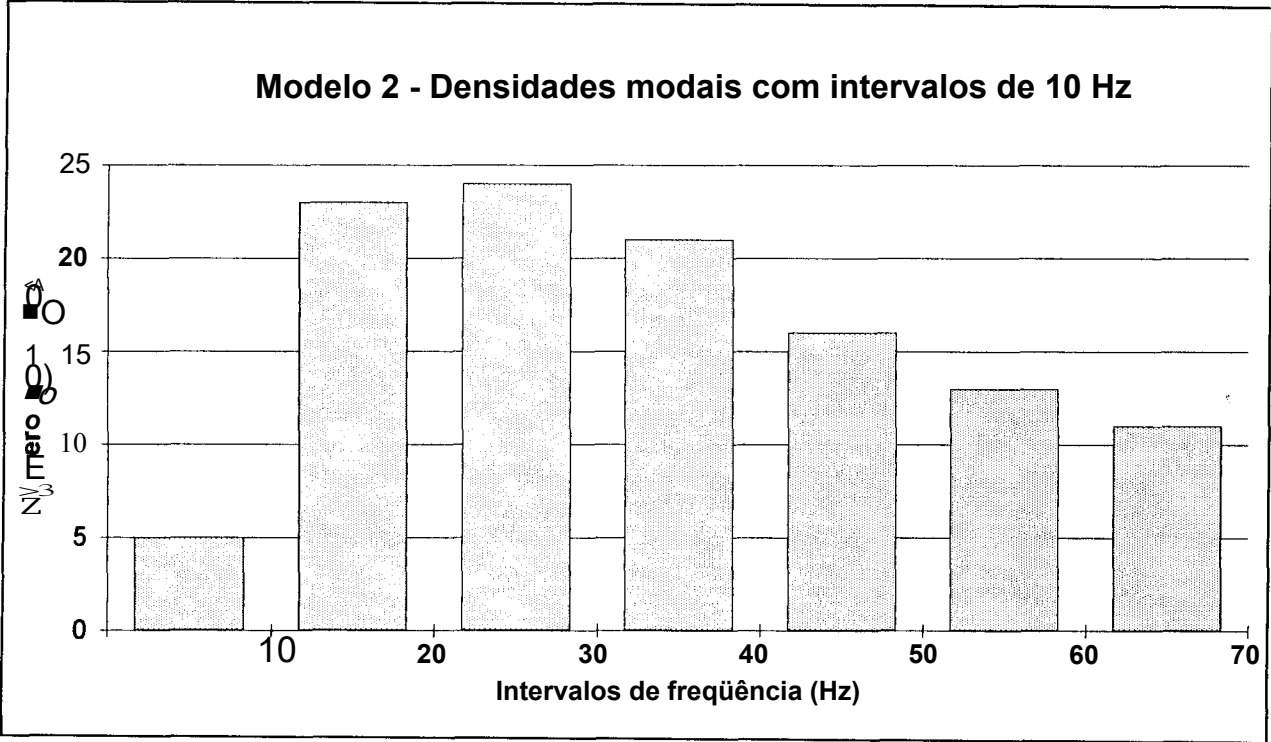


Figura 6.5 - Modelo 2 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 10 Hz

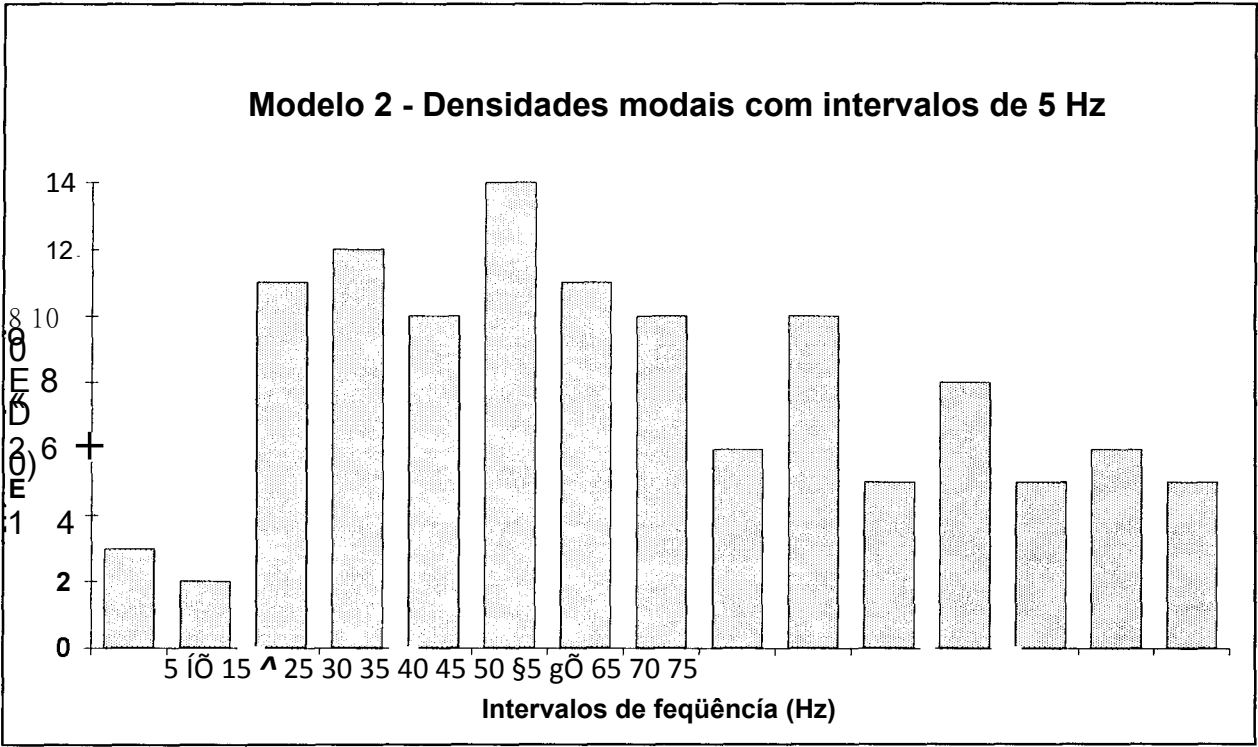


Figura 6.6 - Modelo 2 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 5 Hz

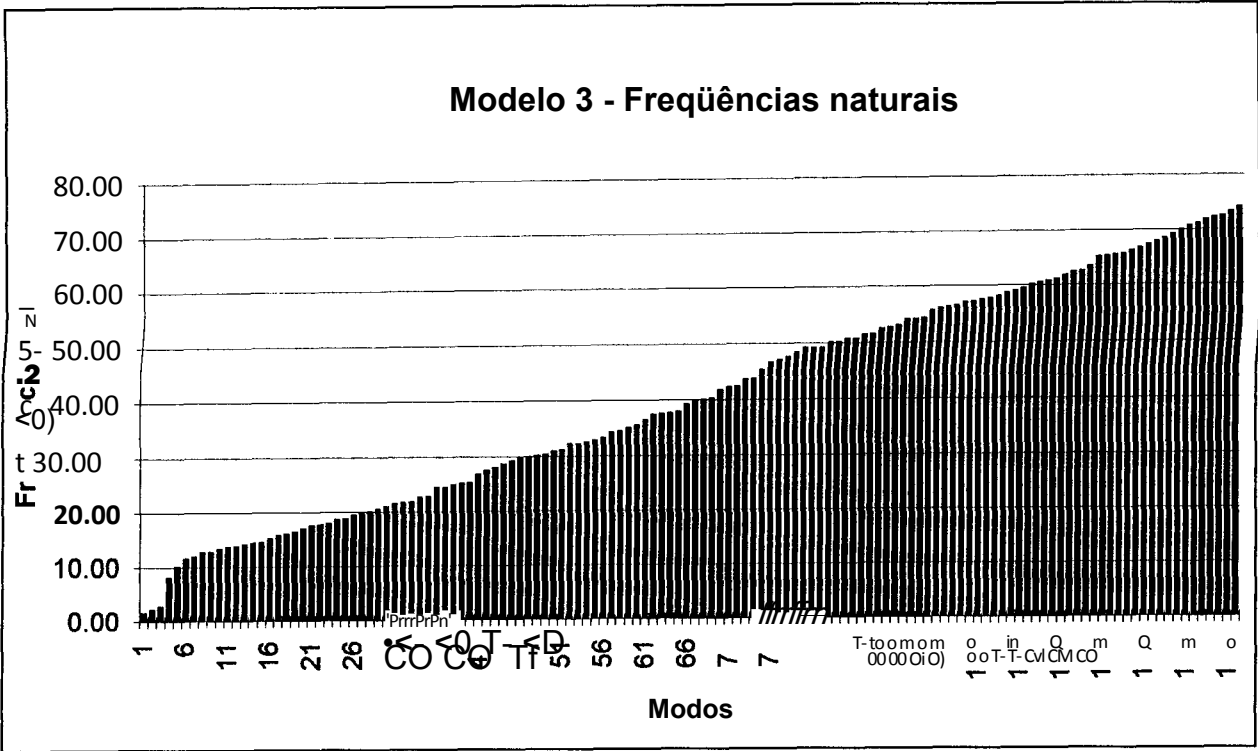


Figura 6.7 - Modelo 3 - Gráfico das frequências naturais

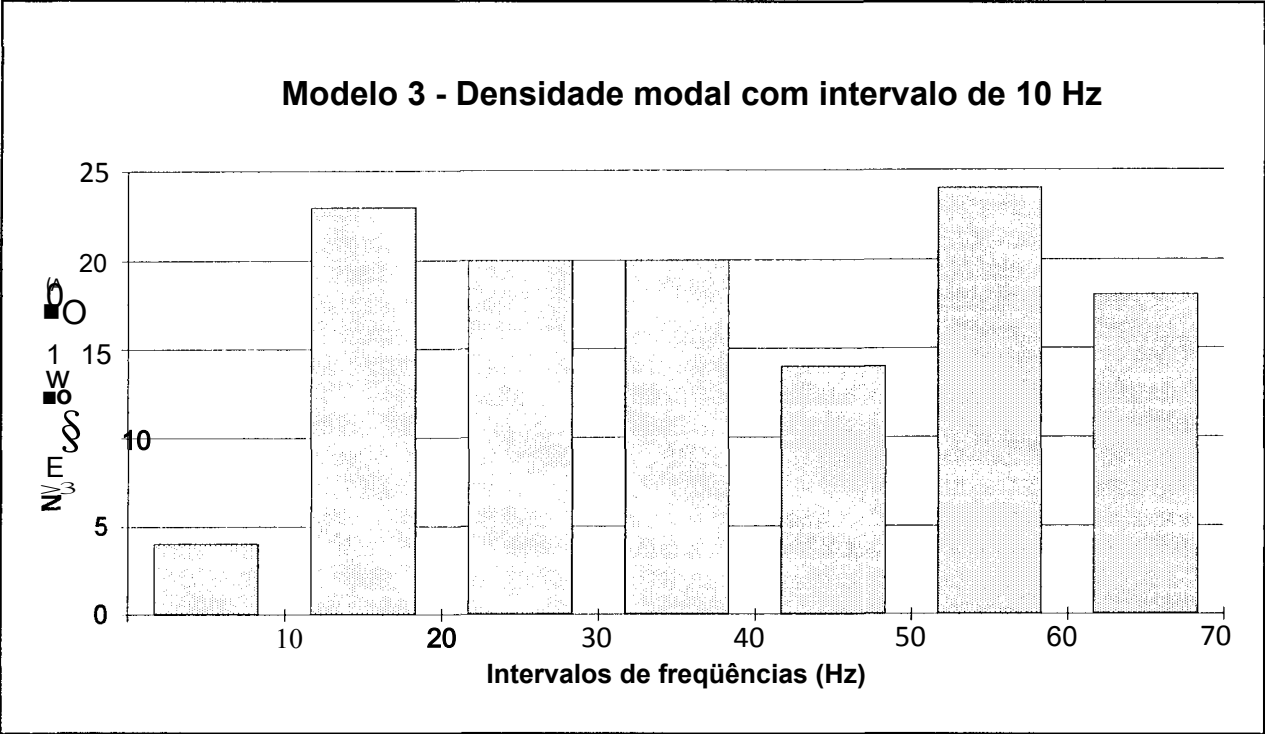


Figura 6.8 - Modelo 3 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 10 Hz

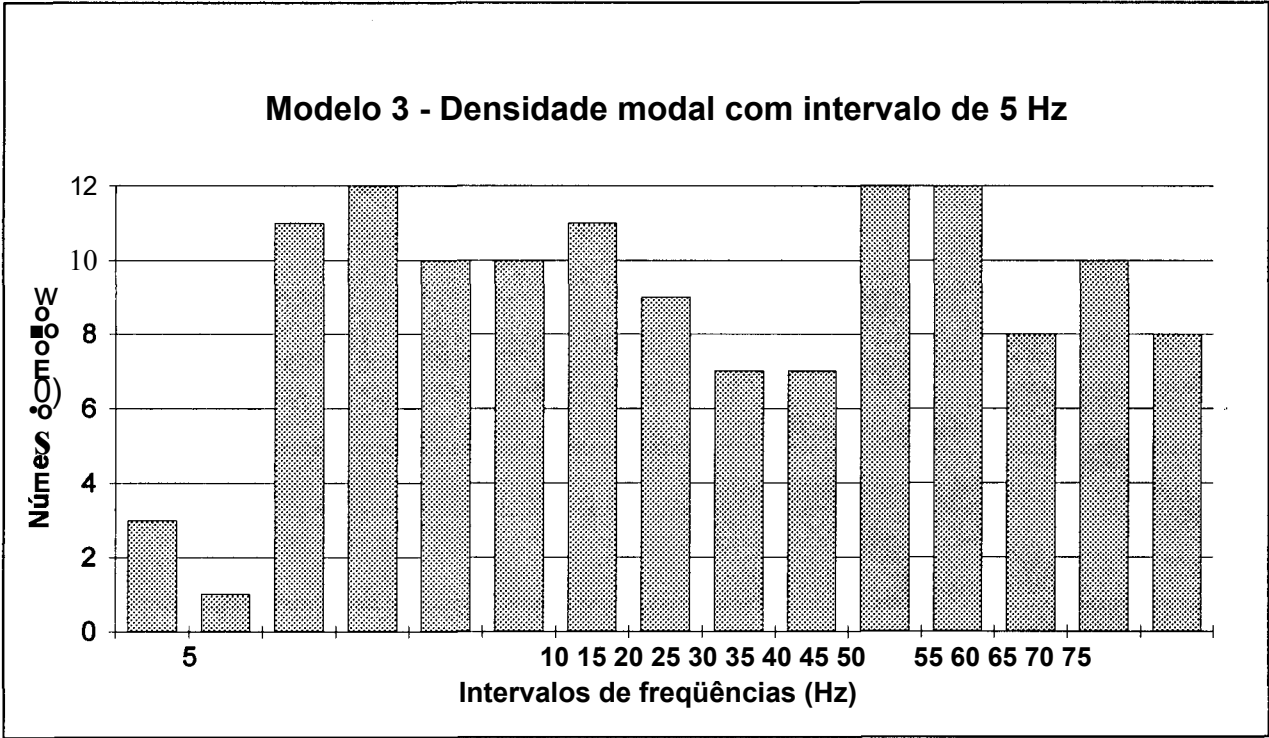


Figura 6.9 - Modelo 3 - Gráfico das densidades modais com intervalo de 5 Hz

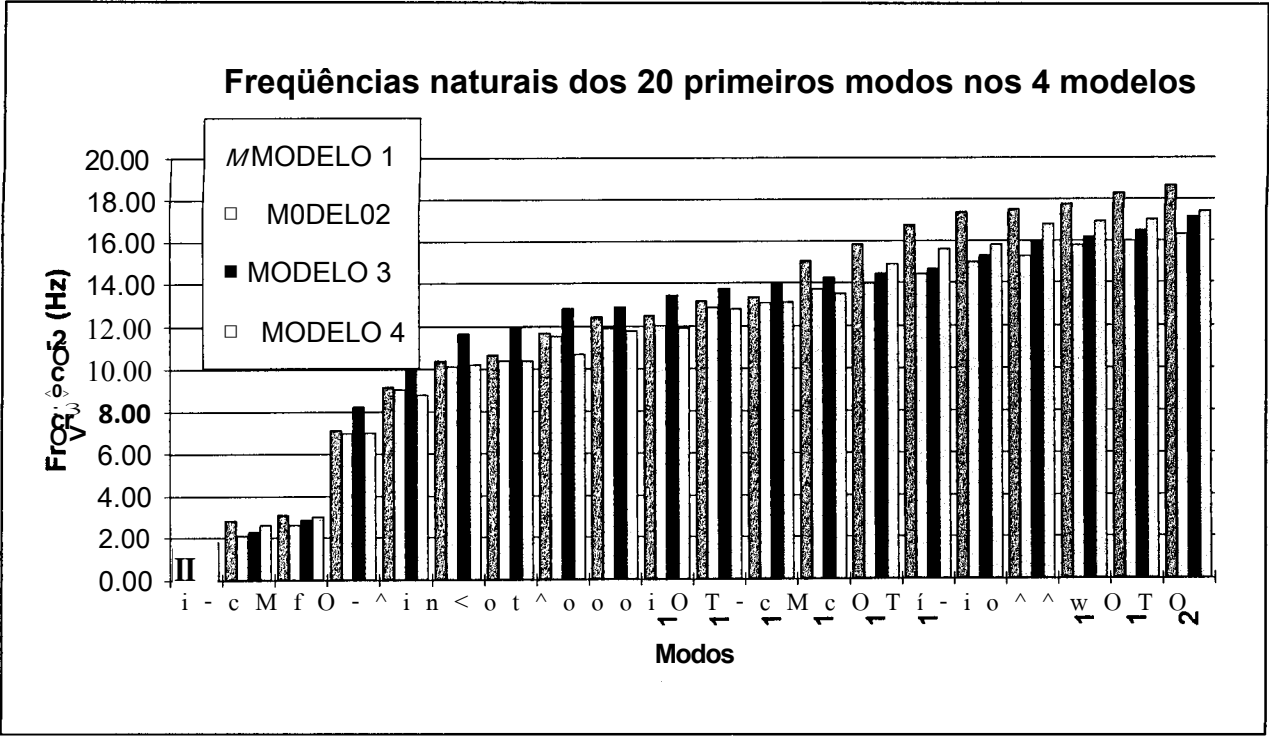


Figura 6.10 - Gráfico das frequências naturais dos 20 primeiros modos naturais.

7 - Análise no domínio da frequência

7.1 - Procedimentos.

Este capítulo destina-se à análise do comportamento da estrutura no domínio da frequência, conforme os critérios de verificação (capítulo 4). Deve-se verificar a flexibilidade dinâmica de cada mancal das turbinas e cada sapata do gerador, aplicando-se, em cada um desses pontos, uma carga harmônica de 10.000 N girando em torno de um eixo longitudinal em frequências que variam desde 0 Hz até 72 Hz. Com este objetivo estão calculadas as respostas nos 5o. e 6o. mancais e 1a. e 2a. sapatas, para a carga de 10.000 N que foi aplicada em frequências que variam desde 0 Hz até 75 Hz em regime estacionário.

Desde o advento dos computadores, tem sido usual, em problemas deste tipo, estabelecer um incremento adequadamente pequeno e varrer o intervalo, calculando a resposta a cada incremento. Com esse enfoque, inicialmente, foram feitos 75 incrementos de 1 Hz, para os modelos 1 e 2, cuja resposta gráfica mostrou de maneira clara que muitos valores de picos de deslocamentos não estavam sendo calculados porque as frequências do carregamento não coincidiam com as frequências naturais e, por isso, os intervalos de incremento deveriam ser reduzidos. Entretanto, como os tempos de processamento e, principalmente, os arquivos de saída estavam muito grandes, a redução de intervalo seria impraticável. Adotou-se outra solução, possível no programa, fazendo a frequência da carga aplicada variar, passando apenas por valores coincidentes com os das frequências naturais, no mesmo intervalo de 0 Hz a 75 Hz, encontradas na análise modal, solução que garante que as respostas sejam as de maiores deslocamentos possíveis para o intervalo analisado.

O programa MSC/NASTRAN dispõe de duas versões para solução de problemas dinâmicos lineares; direta e modal. Os modelos menores, 1 e 2, permitiram que a análise no domínio da frequência fosse feita direta, isto é, sem artifícios para redução das dimensões das matrizes do sistema linear. Entretanto, devido ao grande tamanho, no modelo 3 a análise direta esgotava o espaço de armazenamento temporário disponível em disco, da ordem de 2Gbytes. Após várias tentativas conseguiu-se executar o modelo 3 com redução modal, que teoricamente

reduz o grau de precisão das respostas. Com o objetivo de comparar respostas entre o método direto com a redução modal, executou-se o modelo 2 pelos dois métodos e os resultados (gráficos) obtidos foram idênticos.

As respostas estão apresentadas em gráficos cartesianos, lendo-se no eixo das ordenadas as frequências de excitação e no eixo das abcissas os deslocamentos obtidos em regime estacionário. A opção de saída gráfica permite uma boa interpretação e análise crítica e evita as volumosas listagens numéricas que são difíceis de serem manipuladas e são inadequadas para análise crítica.

7.2 - Amortecimento.

A equação do movimento para a análise direta no domínio da frequência é:

$$[V[M] + to[B] + [K]]\{u(a)\} = \{P(<o)\} \quad (7.1)$$

Na equação acima, o programa trata a matriz de amortecimento [B] como sendo conexão de graus de liberdade específicos, que nesta análise é nula.

A matriz de rigidez complexa [K] é dada por:

$$[K] = [0 + iG][K'] + ij;GE[kE] \quad (7.2)$$

sendo:

[K'] = matriz de rigidez global;

G = 2[^] = coeficiente de amortecimento estrutural global (PARAM,G);

[UE] = matriz de rigidez do elemento;

GE = coeficiente de amortecimento estrutural do elemento.

Para análise modal é introduzido um conjunto de pontos extras (Ue) e as coordenadas são transformadas de físicas em modais e o problema se transforma em um sistema desacoplado de 1 grau de liberdade com equações do tipo:

$$\xi_i = \frac{5}{-m_i\omega^2 + ib_iQ + k_j}$$

onde: m_j = iésima massa modal;

k_j = iésima rigidez modal;

P_i = iésima força modal.

A determinação do amortecimento é tarefa difícil. Existem trabalhos sobre diversos aspectos do assunto, mas ainda não há um procedimento adequado e conclusivo para estabelecer valores teóricos. Para a estrutura presente, existem fatores que tornam ainda mais difícil alocar parâmetros, pois uma grande quantidade de escadas, passarelas e outras estruturas, dutos para vapor, água e cabos, amortecem vibrações e, ainda, há a transmissão de energia para o solo, através das fundações profundas, e para estruturas contíguas. Não se dispondo de valores de referência para estruturas de tipo semelhante, adotou-se aqui a premissa de que o amortecimento é do tipo estrutural e uniforme em toda a estrutura, com coeficiente de amortecimento $\zeta_r = 0,01$ (representado no programa MSC/NASTRAN por (PARAM,G,0.02). Este valor foi sugerido com base em experiências do Laboratório de Dinâmica Estrutural e Confiabilidade para outros tipos de estruturas grandes. Com a hipótese de que o amortecimento é global e que não há elementos que possuam coeficientes de amortecimento próprios diferentes dos demais, a segunda parcela do membro da direita da equação (7.2) pode ser desprezada.

7.3 - Aplicação da carga no programa MSC/NASTRAN.

O programa divide cada execução em "SUBCASES". Para cada "subcase" deve ser especificado o conjunto de apoios ativo (SPC), o carregamento (DLOAD), as frequências de aplicação da carga (FREQ) e a forma de resposta desejada (DISP). Os três modelos são construídos de maneira diferente, porém para facilidade de manipulação de registros de cargas e deslocamentos os nós que representam pontos de aplicação de carga ou medida de deslocamento foram numerados igualmente em todos eles. Com isso, os comandos são iguais nos três modelos, com exceção das frequências da carga, reduzindo a possibilidade de erro pois, uma vez conferidos, basta copiar os arquivos de comandos integralmente de um para outro modelo.

As frequências da carga, que são específicas para cada modelo por serem ressonantes com suas frequências naturais, são aplicadas através de comandos FREQ que podem ser vistos nos quadros 7.1 a 7.3.

- Carga no 5o. mancai.

O 5o. mancai apoia-se em um suporte metálico de grande rigidez, que por sua vez apoia-se na transversina nas áreas M, definidas no capítulo 3, cujos centros de

gravidade são os nós 162 e 163. A carga está aplicada igualmente dividida nos dois nós, tanto em magnitude como em fase. Ver comandos no quadro 7.4.

- Carga no 6o. mancaí.

Analogamente ao 5o. mancaí, o 6o. mancaí apoia-se em suporte metálico que tem seus centros de apoio nos nós 164 e 165, com a carga dividida igualmente nos dois nós. Ver comandos no quadro 7.5.

- Carga na 1a. sapata.

O gerador tem dois pares de sapatas. O par que define a 1a. sapata do gerador corresponde ao nó 166 ou o simétrico 167. A carga, neste caso, é integralmente aplicada em uma das sapatas. Como são simétricas basta a resposta de uma que foi escolhida a correspondente ao nó 166. Ver comandos no quadro 7.6.

- Carga na 2a. sapata.

O par que define a 1a. sapata do gerador corresponde ao nó 168 ou o simétrico 169. Por razões idênticas aplica-se carga e obtém-se resposta no nó 168. Ver comandos no quadro 7.7.

7.4 - Análise dos resultados.

A análise presente mostra que a estrutura apresenta rigidez adequada para as especificações técnicas. Os deslocamentos observados nas baixas frequências, principalmente os que correspondem ao segundo modo nos três modelos não são importantes, dado o fato de que a máquina passa por essas frequências muito rapidamente e neste modo (do 1o. ao 3o. modo) a mesa, isto é, todos os apoios do equipamento (mancais e sapatas), desloca-se quase monoliticamente não havendo deslocamentos relativos importantes entre eles e, portanto, não acarretando tensões internas no eixo. De qualquer modo, as curvas de tolerância plotadas sobre os gráficos de resposta mostram que os deslocamentos dos mancais individualmente estão dentro dos valores tolerados.

Comparando as respostas obtidas com as especificações tem-se;

a) - Turbina.

Cada mancaí das turbinas deve apresentar resposta à carga de 10.000 N tal que o fator de ganho seja menor do que 1, interpretado como sendo na faixa de 55 a 65 Hz. Para que a apresentação neste trabalho não se torne excessivamente volumosa, mostram-se apenas os resultados do 6o. mancaí da turbina, onde estão

plotados os gráficos das respostas, isto é, deslocamentos nas direções X, Y e Z, em que foram marcados os deslocamentos para carga estática como uma reta paralela ao eixo das abcissas para referência e comprovação de que o fator de ganho é menor que 1 na faixa de interesse,

b) - Gerador.

Os deslocamentos de cada mancal do gerador não devem ultrapassar os valores, calculados nas placas da base do gerador:

- $2p,m/10.000\text{ N}$ para a banda de frequência de 55 a 65 Hz;

- $5 (60/fpf)^m/10.000\text{ N}$ para a banda de frequência de 0 a 72 Hz, exceto a banda anterior.

Os critérios de projeto estão atendidos folgadoamente para o gerador. Para visualização plotou-se manualmente nos gráficos dos deslocamentos na 1a. sapata, gerados em pós-processamento pelo programa MSC/XL, a curva de deslocamentos limites.

7-5 - Comparação dos resultados.

Conforme visto na análise modal, o modelo 3 apresenta maior densidade modal, no intervalo analisado de 0 a 75 Hz, do que o modelo 2 e este mais do que o modelo 1. Como consequência, nas frequências mais altas, não se consegue identificar os mesmos modos nos três modelos, nem se consegue excitar os três modelos com frequências respectivamente ressonantes com os mesmos modos, e as respostas não são adequadas para comparação racional.

O 1o. modo se caracteriza por oscilação da mesa na direção do eixo longitudinal X, enquanto que a excitação é harmônica com uma força ortogonal a X, de 10.000 N, girando em torno do mesmo eixo X, fazendo com que os deslocamentos que aparecem sejam efeito secundário de pequeno valor. Os deslocamentos adotados como parâmetros de comparação entre os três modelos são os correspondentes às frequências ressonantes com o 2o. modo, que é uma oscilação da mesa no sentido do eixo Y. Para comparar os resultados, os deslocamentos máximos correspondentes ao 2o. modo de cada modelo em cada uma das três direções estão aglutinados na tabela 7.1, onde estão calculadas médias, desvios-padrão e coeficientes de variação, respectivamente.

O coeficiente de variação de 31,6% parece ser maior do que o inicialmente esperado, em torno de 10%. Esta diferença fez com que uma revisão nos dados de entrada fosse feita, sob suspeita de erro do tipo grosseiro que não se confirmou. A observação dos modelos leva a alguns fatores que justificam uma variação tão grande:

- a) - A influência da fundação é de grande importância nas respostas para o 2o. modo, pois no modelo 1, supõe-se engastamento ao nível do topo do bloco e, para os demais, consideram-se rigidez e massa do bloco e, também, rigidez das estacas. Isto se confirma quando se nota que a resposta do modelo 1 apresenta menores deslocamentos, sendo ele nitidamente mais rígido que os demais.
- b) - Um acúmulo de incertezas ocorre. A frequência de excitação da carga é diferente para cada modelo, como consequência das incertezas surgidas na análise modal, e se superpõe às incertezas inerentes à análise no domínio da frequência.

7.6 - Constatações.

A busca de respostas sob forma de deslocamentos máximos para uma faixa de frequências varrida por meio de incrementos constantes exige que tais incrementos sejam muito pequenos, o que demanda considerável esforço computacional para que não se percam valores de pico. Havendo limitação de tempo ou de memória o analista pode ficar tentado a “estimar” um incremento que atenda às necessidades do problema e, assim, perder valores importantes, gerando incertezas que se superpõem às devidas aos modelos.

Pode-se estabelecer, como importante constatação para a análise no domínio da frequência, que as respostas podem divergir fortemente entre modelos distintos da mesma estrutura, mesmo para as frequências mais baixas. O universo de três amostras é pequeno para que se estabeleça um coeficiente de variação que possa ser reconhecido como esperado para outros casos, porém, o valor encontrado de 31,6% é importante, recomendando-se ao analista prudência ao lidar com resultados no domínio da frequência.

Tabela 7.1 - Comparação dos valores obtidos para máximo deslocamento nos 3 modelos.

POSIÇÃO DA CARGA	DIR.	DESLOCAMENTO (m)			MEDIA	DESVIO	VALOR
		MOD. 1	MOD. 2	MOD. 3		PADRÃO	NORMALIZ.
		(u)	(u)	(u)	(ü)	(o)	(%)
	X	1.26E-03	1.70E-03	1.36E-03	0.000144	2.30651 E-04	0.16017448
5o. MANCAL	Y	6.50E-03	7.20E-03	7.60E-03	0.00071	5.56776E-04	0.078419216
	Z	1.58E-04	3.40E-04	4.90E-04	3.29333E-04	1.66257E-04	0.504828429
	X	8.30E-04	8.50E-04	6.70E-04	7.83333E-04	9.86577E-05	0.125945945
6o. MANCAL	Y	5.00E-03	1.12E-02	1.14E-02	0.00092	0.000363868	0.395508813
	Z	1.50E-04	5.60E-04	6.90E-04	4.66667E-04	2.81839E-04	0.603941138
	X	3.10E-04	3.50E-04	2.30E-04	2.96667E-04	6.11010E-05	0.205958458
1a. SAPATA	Y	3.50E-03	6.90E-03	6.60E-03	0.000566667	0.000188237	0.332183715
	Z	1.64E-04	3.00E-04	3.30E-04	2.64667E-04	8.84609E-05	0.334235192
	X	3.90E-04	4.40E-04	2.50E-04	0.000036	9.84886E-05	0.273579383
2a. SAPATA	Y	5.10E-03	8.80E-03	7.20E-03	0.000703333	0.000185562	0.263832524
	Z	1.47E-04	4.80E-04	4.20E-04	0.0000349	1.77491 E-04	0.508569756
						SOMA =	3.787177052
						MÉDIA =	0.315598088

Quadro 7.1 - Modelo 1 - Comando FREQ

\$**** comando FREQ para modelo 1									
FREQ	117	1.551977	2.838116	3.101551	7.109777	9,152329	10,39355	10.67593	+
+	11.68039	12.42666	12.49631	13.15363	13,34215	15,05877	15,82787	16.77100	+
+	17.36702	17.49870	17.76719	18.27403	18,65660	19.34316	19,77523	20.11292	+
+	20.11910	21.18785	22.28735	23.28129	23,58503	23.97665	24,35133	24.83025	+
+	25.30533	25.41926	26.15394	26.57138	26,69920	27.38136	28,20558	29.04205	+
+	29.16026	29.43135	29.62550	29.82381	30.33633	30.51687	30.97389	30.97780	+
+	31.07158	31.66952	31.84369	32.71389	33.19817	33,68330	34.02996	34.73875	+
+	35.28723	35.61002	35.99048	36.50887	36.73934	37,93027	38.90032	40.76832	+
+	40.94557	41.44188	43.87745	45.53981	45.56433	46,35215	46.45842	46.93706	+
+	47.24174	47.49644	48.32433	49.23547	49,47427	51,85318	52.24719	52.91134	+
+	53.50934	54.59056	55.95068	56,53843	57,77354	58,21038	59.02987	60.00444	+
+	60,86443	61.34702	62,02874	63,13466	63,89191	65,37618	65.38985	68.44868	+
+	69.66592	70.75280	73.37030	74.39799					

Quadro 7.2 - Modelo 2 - Comando FREQ

FREQ	117	1.469800	2.106124	2.625351	6.977713	9.031669	10.12218	10.38001	+
+	11.52908	11.91056	12.02589	12.85438	13.06257	13.70454	13.99311	14.39841	+
+	14.99462	15.26320	15.76751	16.01035	16.30750	16.41786	16.49010	16.94626	+
+	17.12431	17.83165	17.95639	18.42427	19.45290	20.01159	20.17006	20.72194	+
+	21.49209	22.00610	22.81433	23.89995	23.99029	24.21137	24.79890	25.52552	+
+	25.55287	26.38717	26.45452	27.50183	27.78558	27.88949	28.07743	28.51960	+
+	28.79549	28.98224	29.33626	29.81649	29.89357	30.02555	30.25223	30.60718	+
+	30.84013	31.08602	31.69369	31.93175	32.07722	33.21173	33.70278	34.43304	+
+	35.24079	35.45095	35.47131	36.18511	36.79342	37.81297	38.41593	39.01359	+
+	39.69219	39.76819	40.78228	42.01119	43.23830	43.72994	44.01041	44.33226	+
+	45.20164	45.76484	46.25137	46.35647	46.83671	47.18065	48.37612	48.56221	+
+	48.85191	49.81688	51.12280	51.29299	52.32888	52.67994	54.37437	55.66074	+
+	56.12917	56.42810	56.82676	57.08467	58.75869	59.42722	59.56645	60.97943	+
+	61.71845	63.05542	63.74294	64.63441	65.11623	65.46127	66.40339	67.70561	+
+	68.38389	69.77823	70.63376	71.17039	72.05174	72.67805	74.55054		

Quadro 7.3 - Modelo 3 - Comando FREQ

FREQ	117	0.729734	2.264935	2.864739	8.267818	10.27242	11.66530	11.97298	+
+	12.82641	12.89328	13.44478	13.7389	13.91165	14.26019	14.45328	14.64289	+
+	15.28876	15.94038	16.16652	16.47064	17.13514	17.64309	17.82578	18.00734	+
+	18.68908	18.92665	19.58692	19.80440	20.18830	20.70682	21.08224	21.54734	+
+	21.78941	21.91888	22.75627	22.85294	24.51307	24.60399	25.02627	25.22767	+
+	25.39541	26.92323	27.56719	28.14984	28.62884	29.31681	29.91174	29.99659	+
+	30.18750	30.48354	31.01480	31.29860	32.33043	32.71448	32.91975	33.36596	+
+	34.36030	34.58773	35.15676	35.67828	36.65542	37.54270	37.69757	37.81004	+
+	38.02536	39.32870	39.97164	40.17101	40.44888	41.97646	42.42435	42.57338	+
+	43.87327	43.95916	45.46715	46.74969	47.28276	47.72885	48.41442	49.26450	+
+	49.31066	50.17982	50.29100	50.83599	50.86899	51.36831	51.52343	52.47588	+
+	52.66818	53.11560	54.06484	54.07281	54.31448	55.69746	56.03047	56.26019	+
+	56.55254	57.08513	57.26148	57.60849	57.82629	58.18239	58.73925	59.09326	+
+	59.54477	60.28080	60.65787	60.92559	61.27051	61.90936	62.56673	62.64918	+
+	63.45648	65.27491	65.40473	65.59547	65.69512	66.32489	66.75502	67.39357	+
+	68.00993	68.63246	69.24471	70.04331	70.78624	71.24774	71.82968	72.30414	+
+	72.56604	73.45312	74.18922						

Quadro 7.4 - Comandos correspondentes à carga no 5o. mancal.

```

SUBCASE 5
SPC= 1
DLOAD = 501
FREQ= 117
DISP (SORTI,PHASE,PLOT) = 123
.....
$ início do BULK DATA
BEGIN BULK
$ especifica padrões de saída
PARAM POST 0
PARAM AUTOSPC YES
.....
$ comando DAREA - especifica nó, direção e sentido das cargas
DAREA 51          162 2          -1.
DAREA 52          163 2          -1.
DAREA 53          162 3          -1.
DAREA 54          163 3          -1.
$ comando RLOAD - identifica o comando DAREA, o comando DPHASE, e qual variação TABLED
RLOAD2 511 51          95          555
RLOAD2 512 52          555
RLOAD2 513 53          95          555
RLOAD2 514 54          555
$ comando DLOAD - compõe o carregamento por combinação linear das cargas RLOAD
DLOAD 501 1.          1.          511 1.          512 1.          513 +
+          1.          514
$ comando DPHASE - estabelece o ângulo de fase e o retardo da carga
DPHASE 95          162 2          90.          163 2          90.
DPHASE 91          146 2          90.          147 2          90.
$ comando TABLED - fornece tabela para interpolação (no caso, não varia de 0 a 75 Hz)
TABLED 500
          0.          5000. 75.          5000. ENDT

```

Quadro 7.5 - Comandos correspondentes à carga no 6o. mancal.

```

SUBCASE 6
SPC= 1
DLOAD = 601

```

Quadro 7.5 - Comandos correspondentes à carga no 6o. mancai (continuação).

FREQ= 117								
DISP (SORTI,PHASE,PLOT) = 123								
.....								
D ARE A 61	164	2	-1.					
DAREA 62	165	2	-1.					
DAREA 63	164	3	-1.					
DAREA 64	165	3	-1.					
\$								
RLOAD2 611	61		96	555				
RLOAD2 612	62			555				
RLOAD2 613	63		96	555				
RLOAD2 614	54			555				
\$								
DLOAD 601	1.	1.	611	1.	612	1.	613	+
+ 1.	614							
\$								
DPHASE 96	164	2	90.	165	2	90.		

Quadro 7.6 - Comandos correspondentes à carga na 1a. sapata do gerador.

SUBCASE 7								
SPC= 1								
DLOAD = 701								
FREQ= 117								
DISP (SORTI,PHASE,PLOT) = 123								
.....								
\$								
DAREA 71	166	2	-1.					
DAREA 72	166	3	-1.					
\$								
RLOAD2 711	71		97	555				
RLOAD2 712	72			555				
\$								
DLOAD 701	1.	1.	711	1.	712			
\$								
DPHASE 97	166	2	90.					

Quadro 7.7 - Comandos correspondentes à carga na 2a. sapata do gerador.

SUBCASE 8						
SPC= 1						
DLOAD = 801						
FREQ = 117						
DISP (SORT1,PHASE,PL0T) = 123						
.....						
\$						
DAREA	81	168	2	-1.		
DAREA	82	168	3	-1.		
\$						
RLOAD2	811	81		98	555	
RLOAD2	812	82			555	
\$						
DLOAD	801	1.	1.	811	1.	812
\$						
DPHASE	98	168	2	90.		

Figura 7.1 - Modelo 1 - Deslocamentos no 6o. mancal das turbinas, direção x.

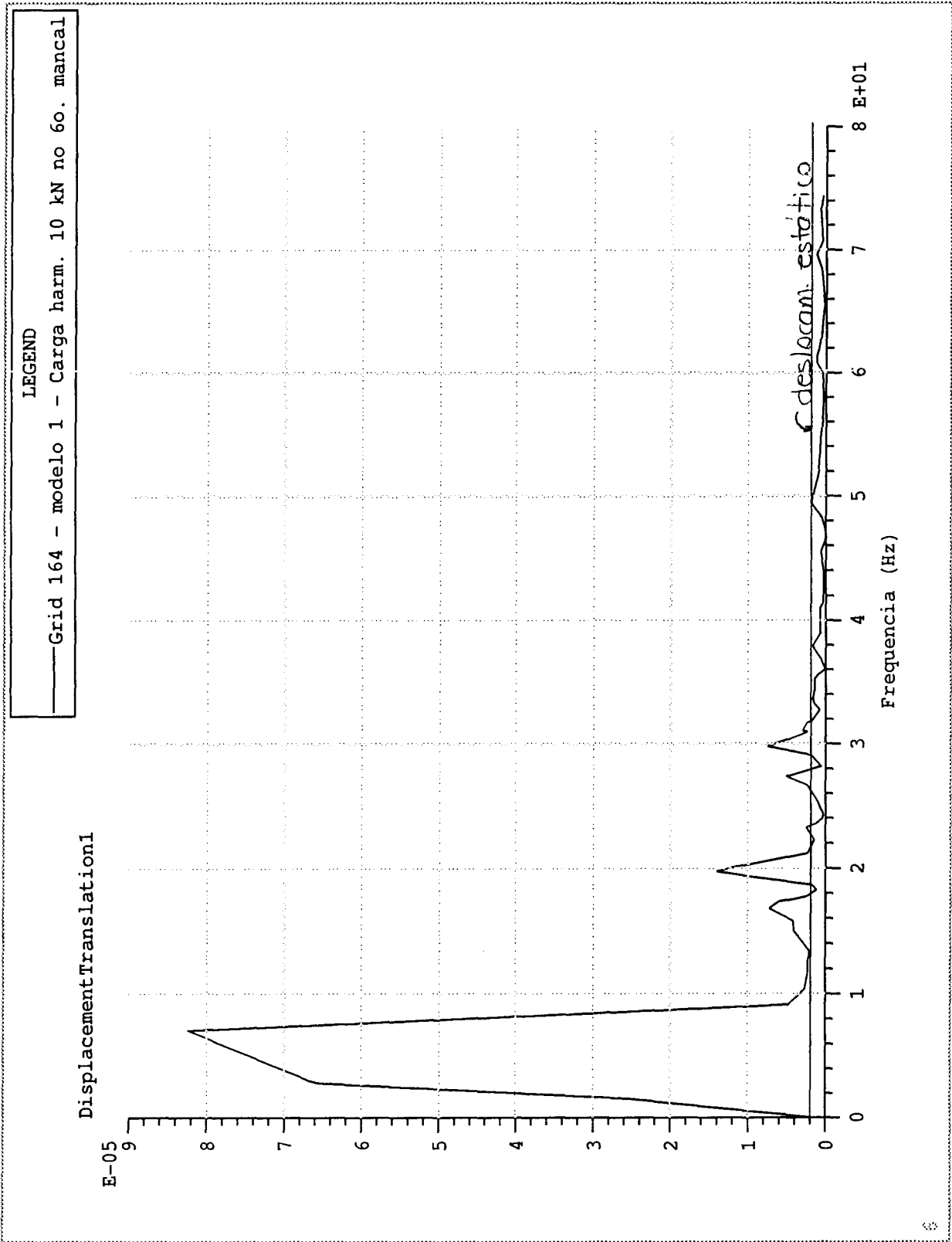


Figura 7.2 - Modelo 1 - Deslocamentos no 6o. mancal das turbinas, direção y.

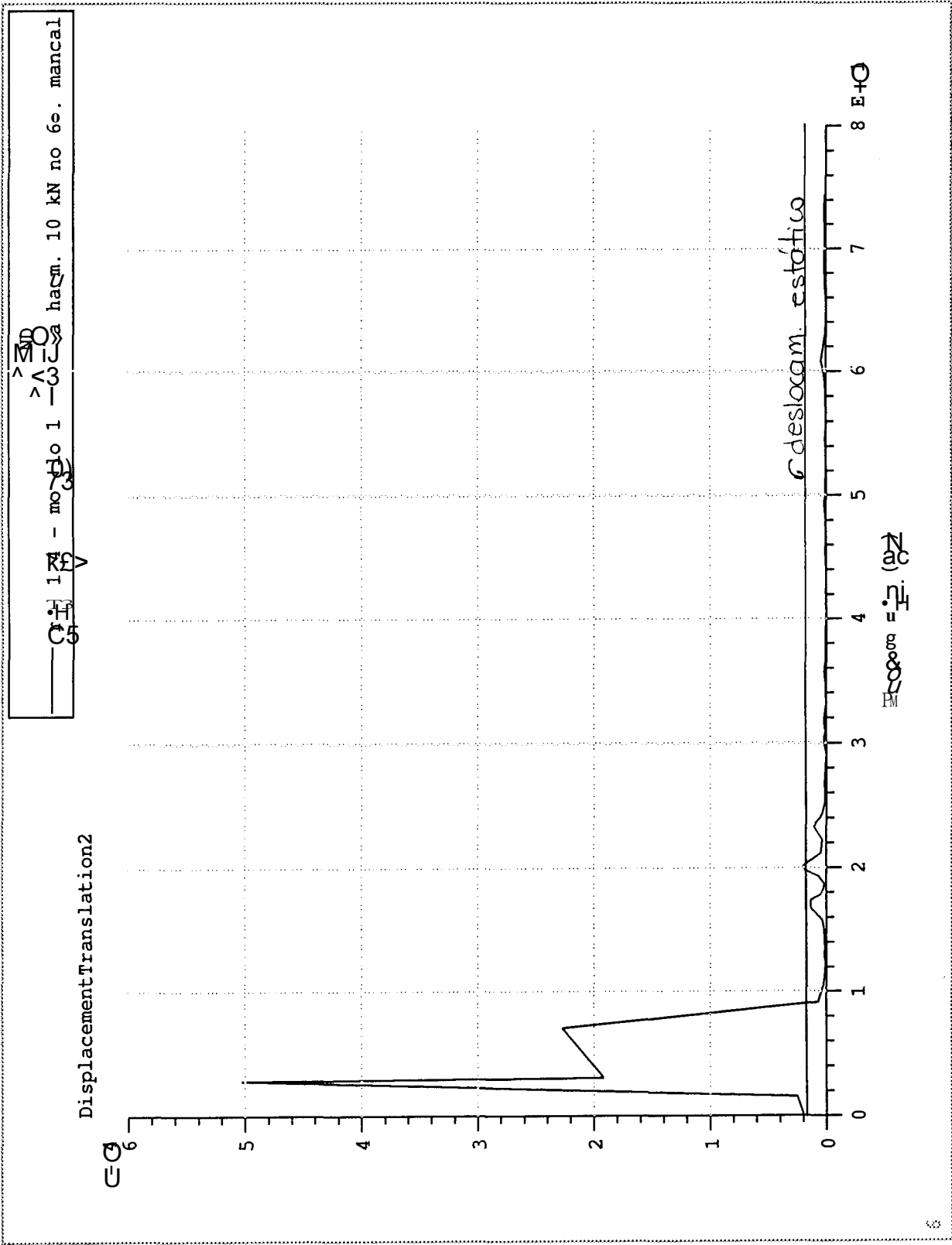


Figura 7.3 - Modelo 1 - Deslocamentos no 6o. mancal das turbinas, direção z.

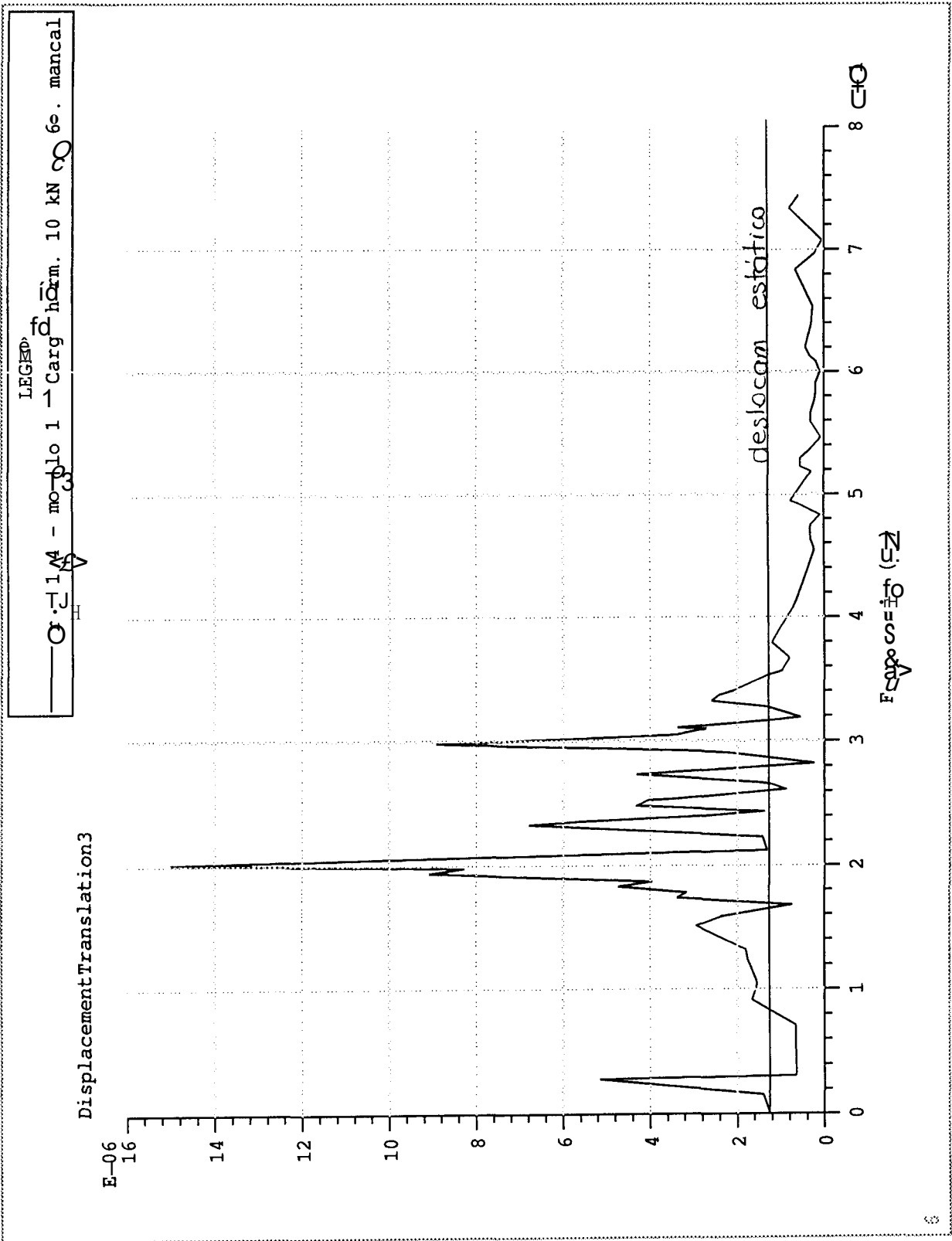


Figura 7.4 - Modelo 1 - Deslocamentos da 1a. sapata do gerador, direções x, y, z.

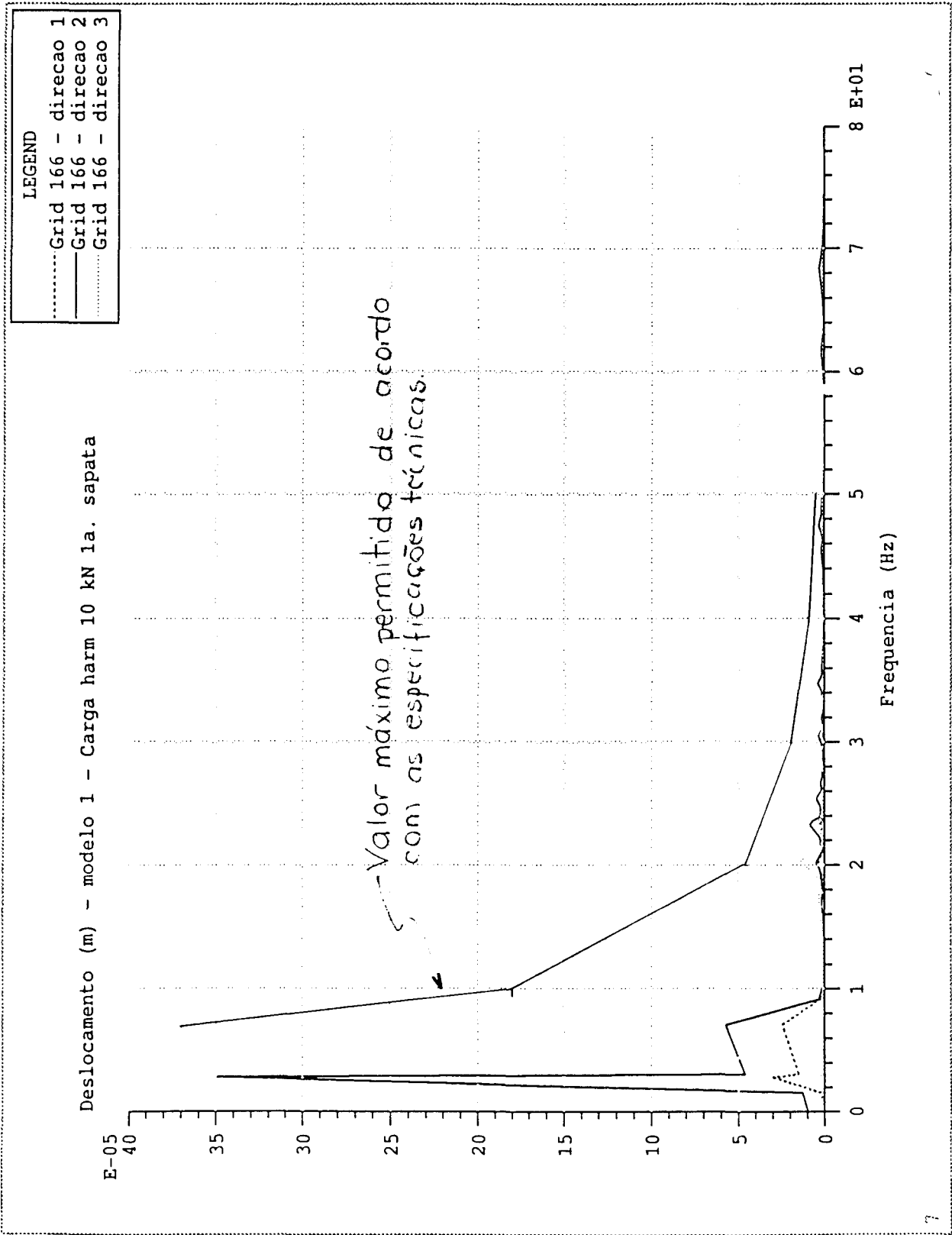


Figura 7.5 - Modelo 1 - Deslocamentos da 2a. sapata do gerador, direções x, y, z.

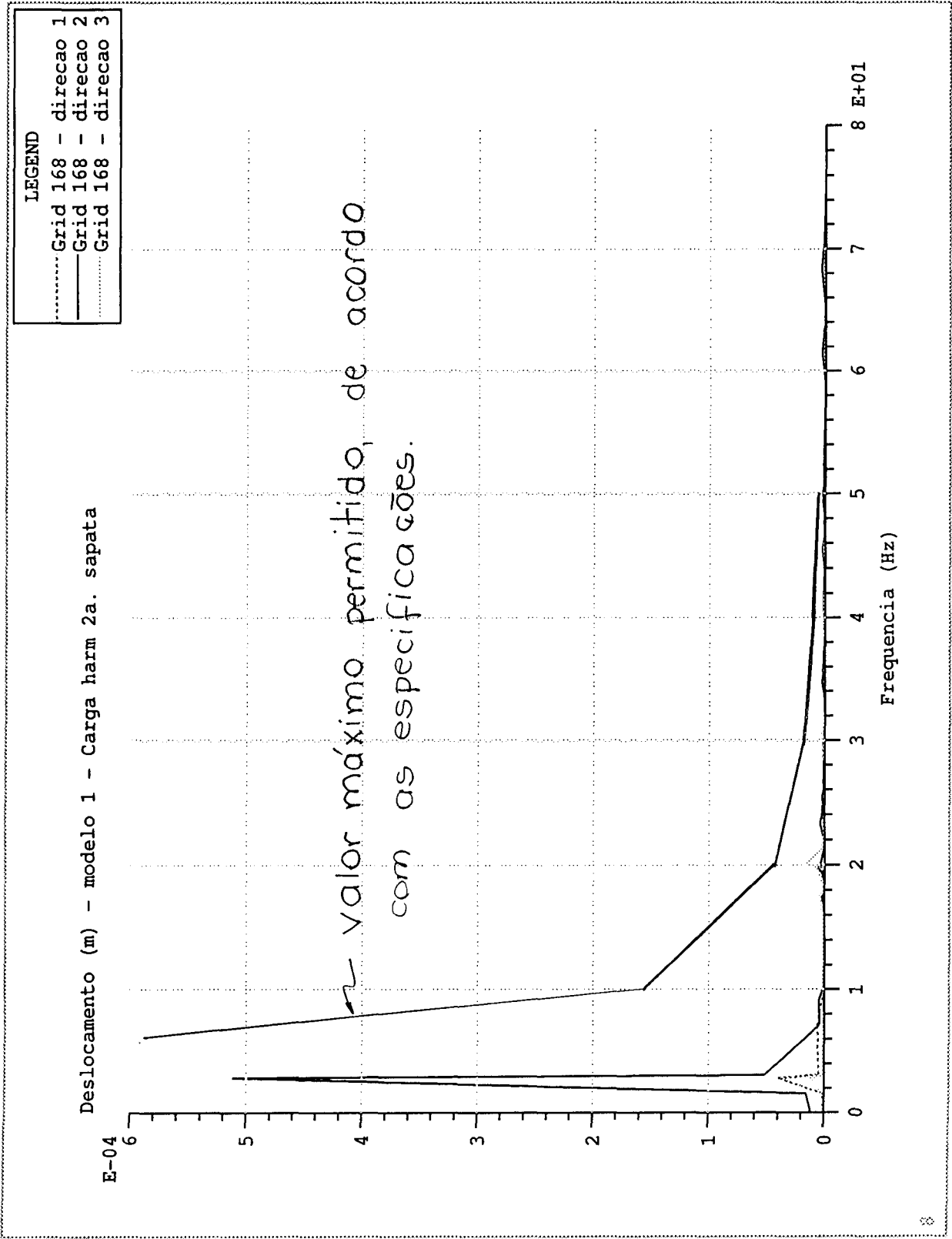


Figura 7.6 - Modelo 2 - Deslocamentos do 6o. mancal das turbinas, direção x.

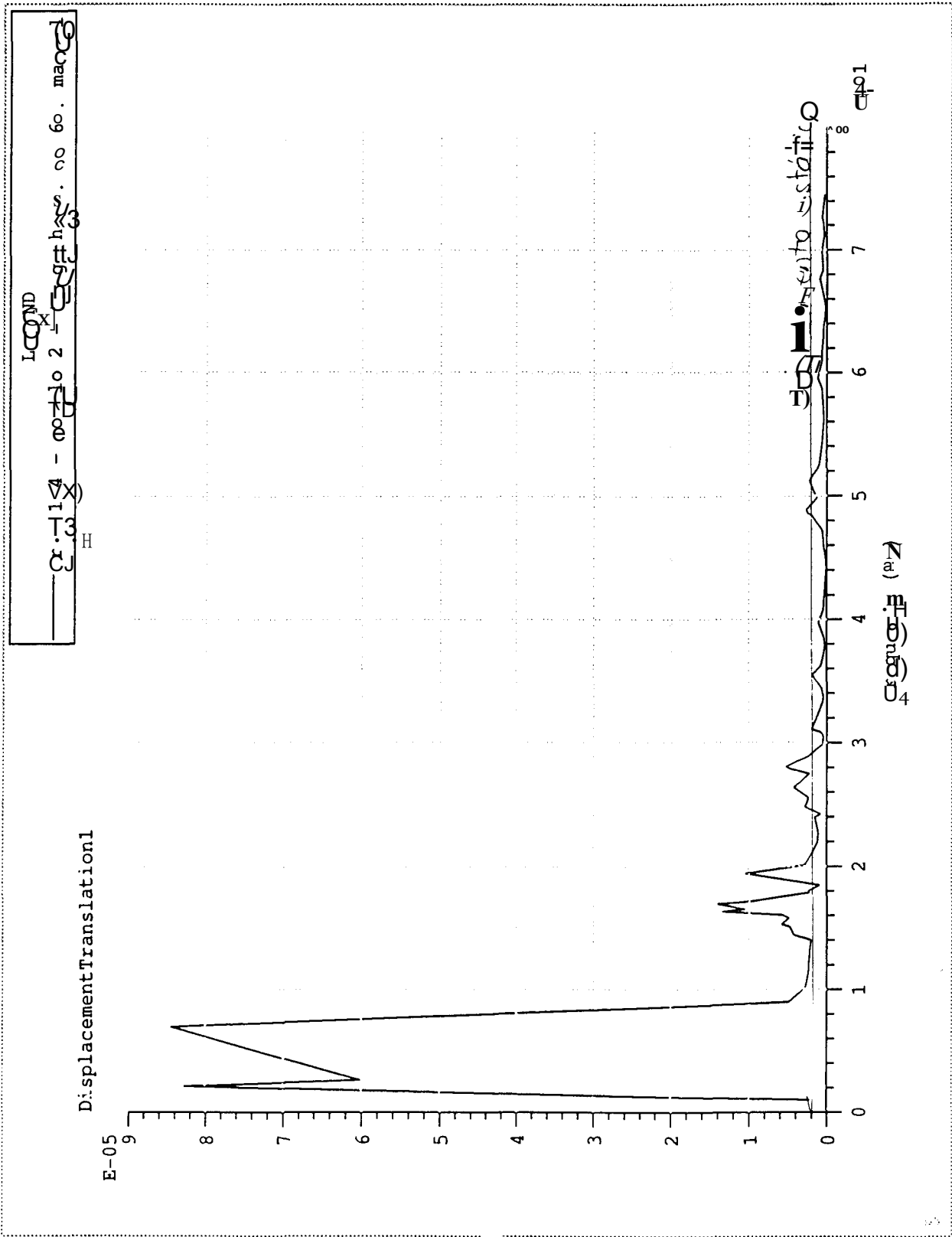


Figura 7.7 - Modelo 2 - Deslocamentos do 6o. mancal das turbinas, direção y.

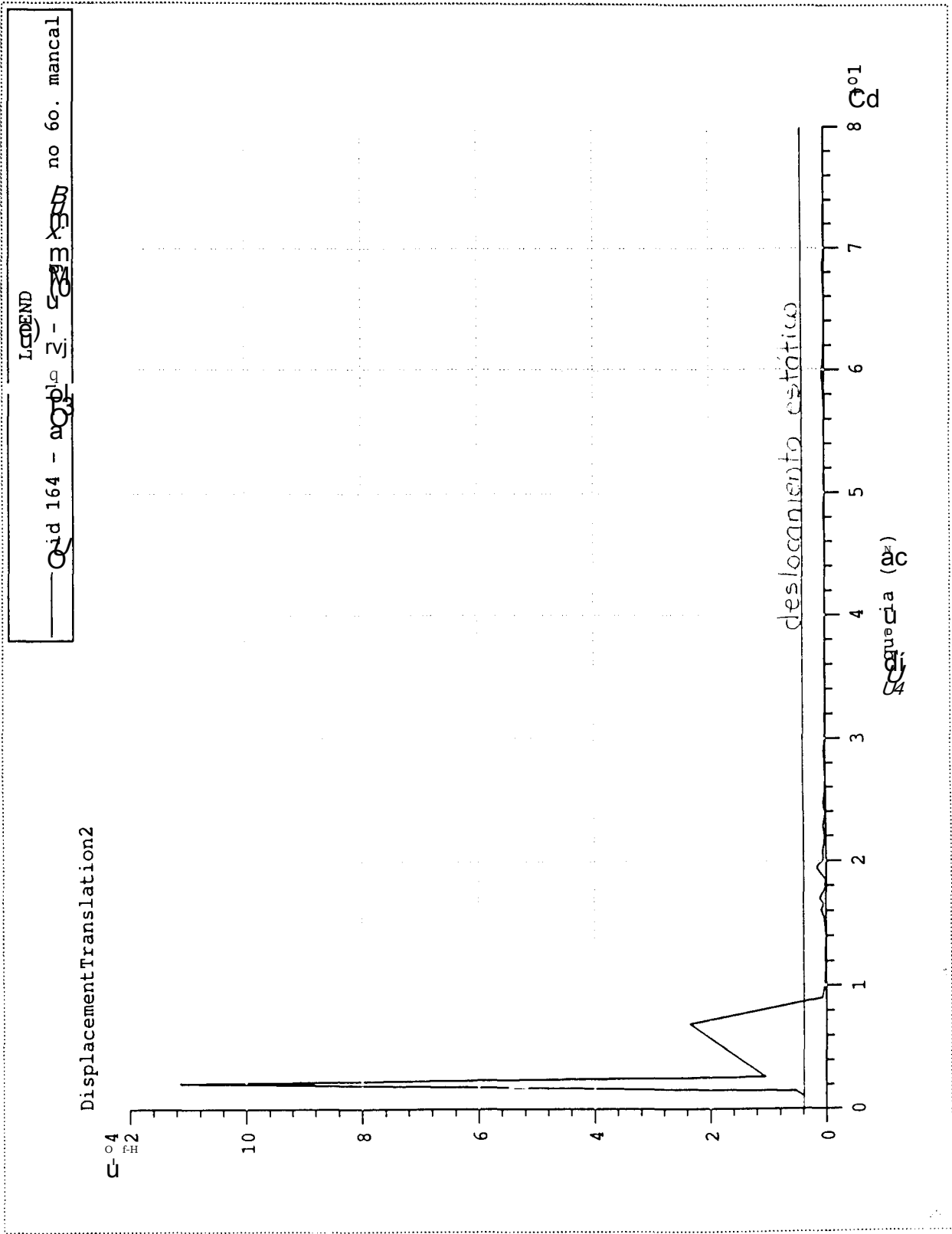


Figura 7.8 - Modelo 2 - Deslocamentos do 6o. mancal das turbinas, direção z.

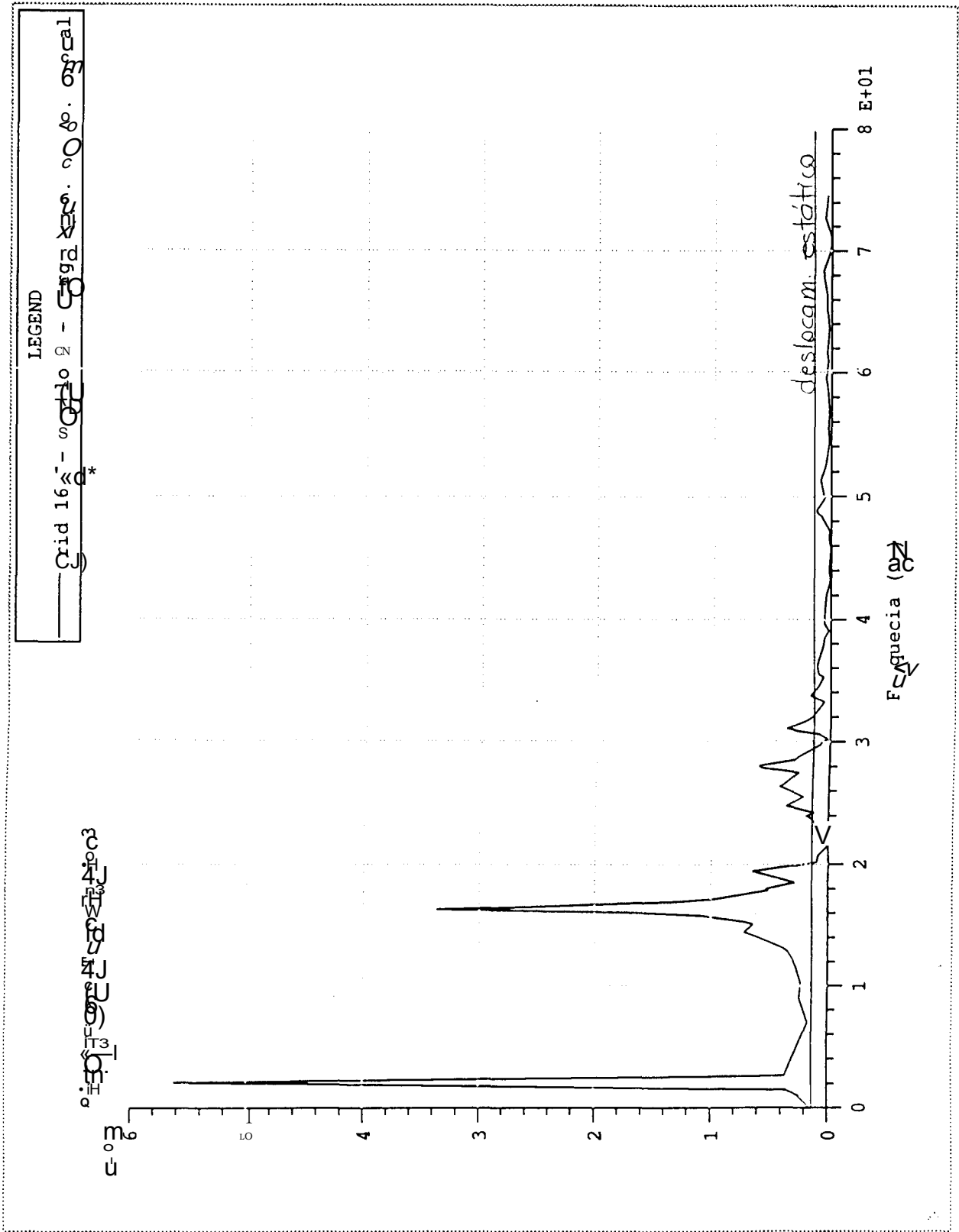


Figura 7.9 - Modelo 2 - Deslocamentos do 1a. sapata do gerador, direções x, y, z.

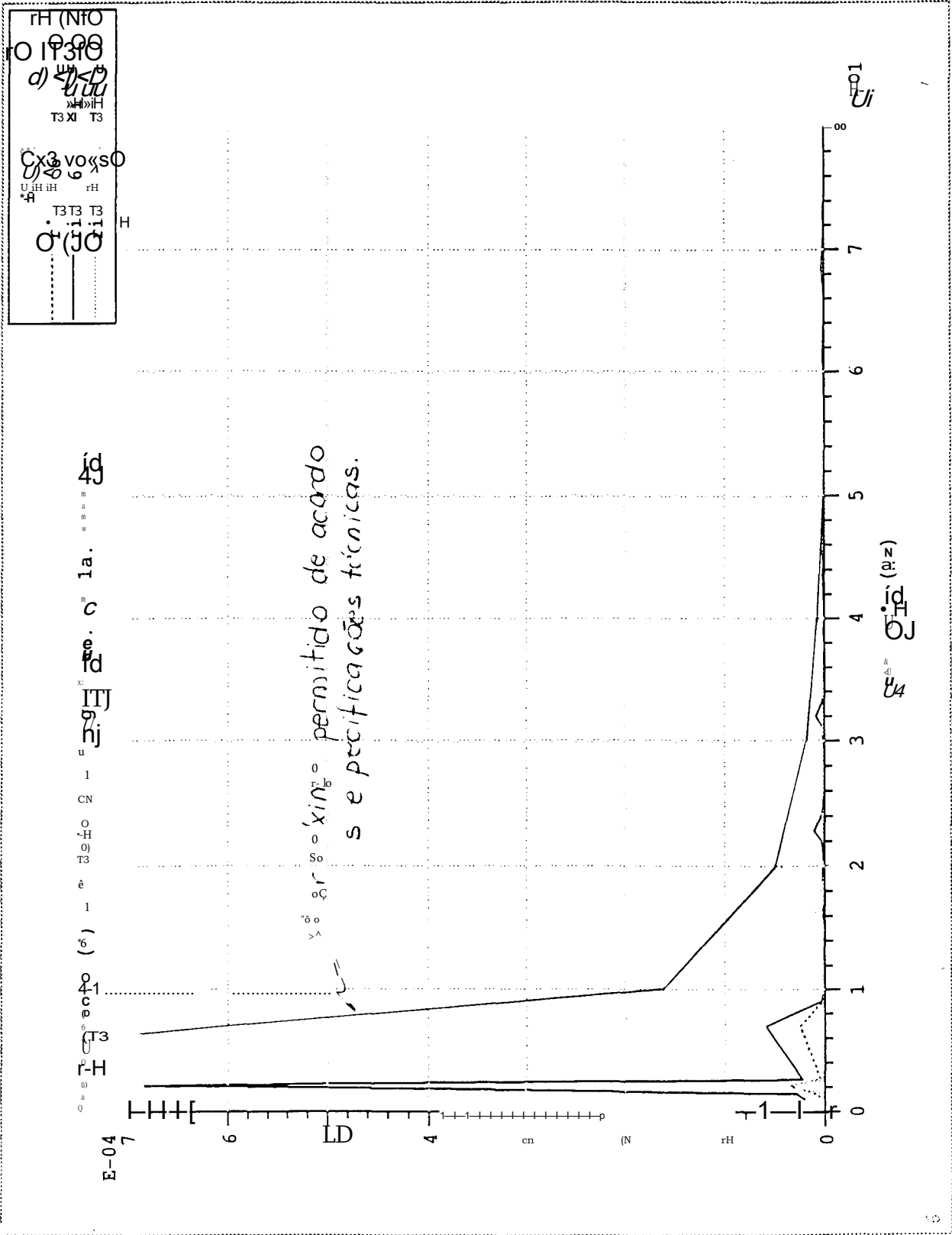


Figura 7.10 - IV/odelo 2 - Deslocamentos da 2a. sapata do gerador, direções x, y, z.

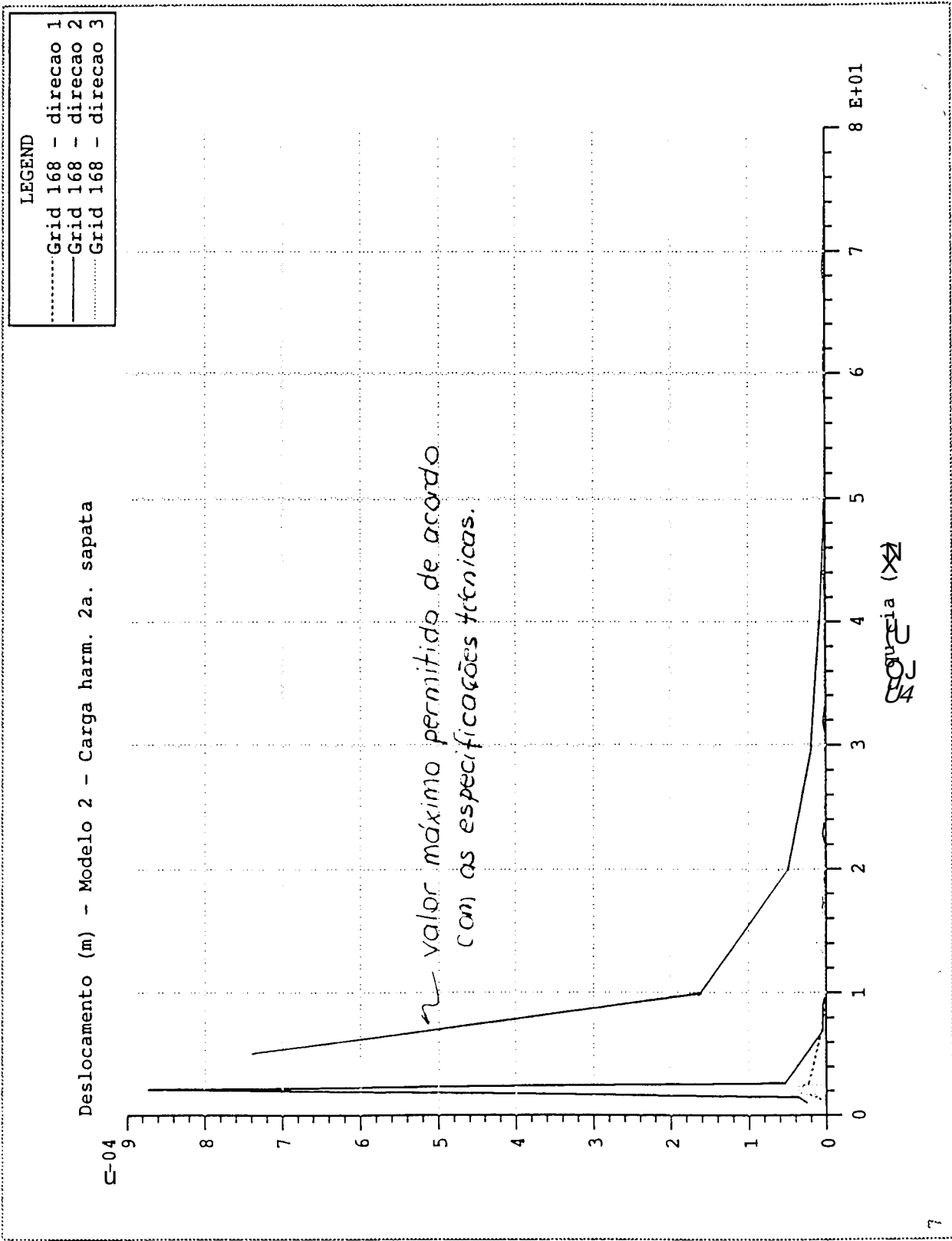


Figura 7.11 - Modelo 3 - Deslocamentos do 6o. mancal das turbinas, direção x.

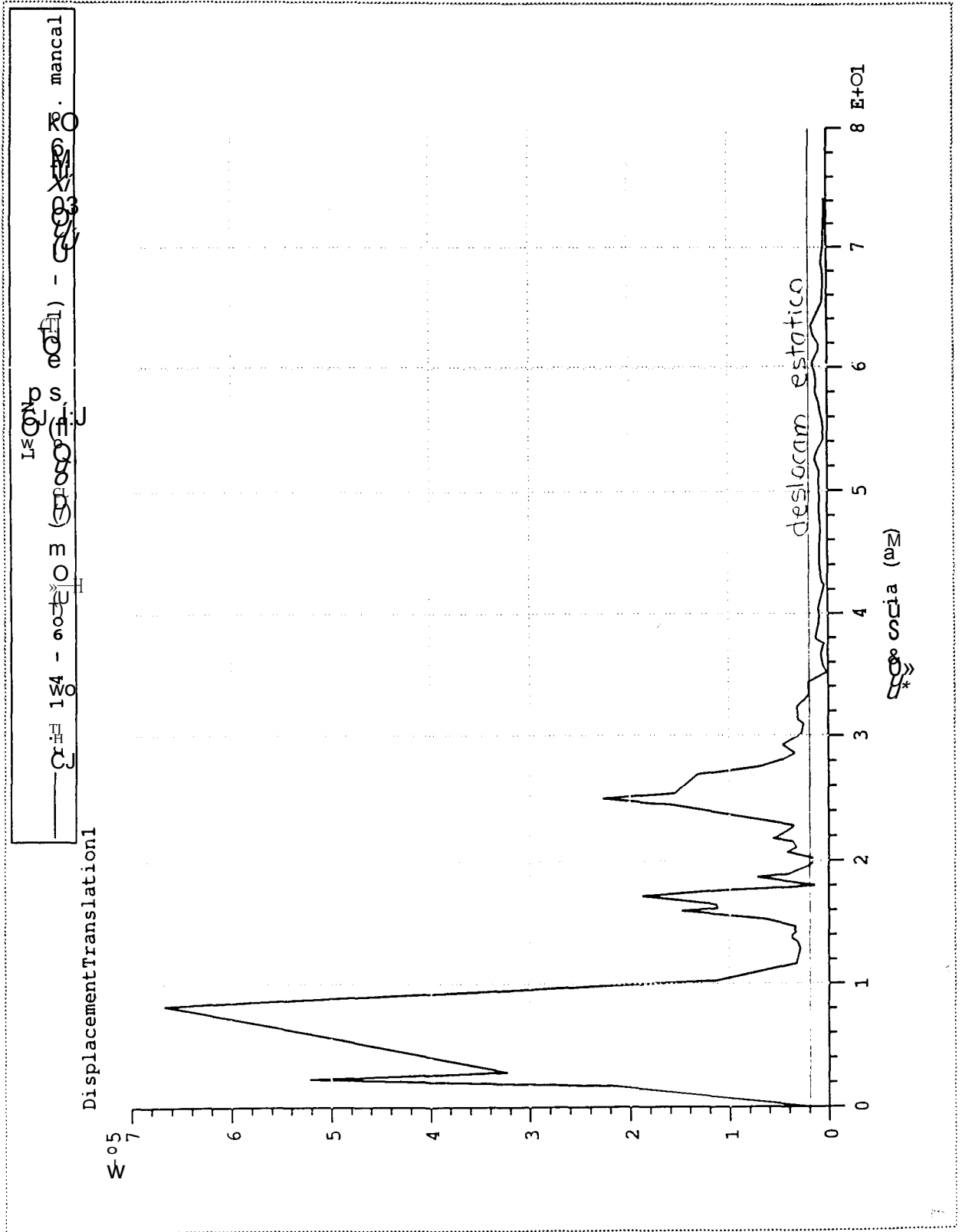


Figura 7.12 - Modelo 3 - Deslocamentos do 6o. mancal das turbinas, direção y.

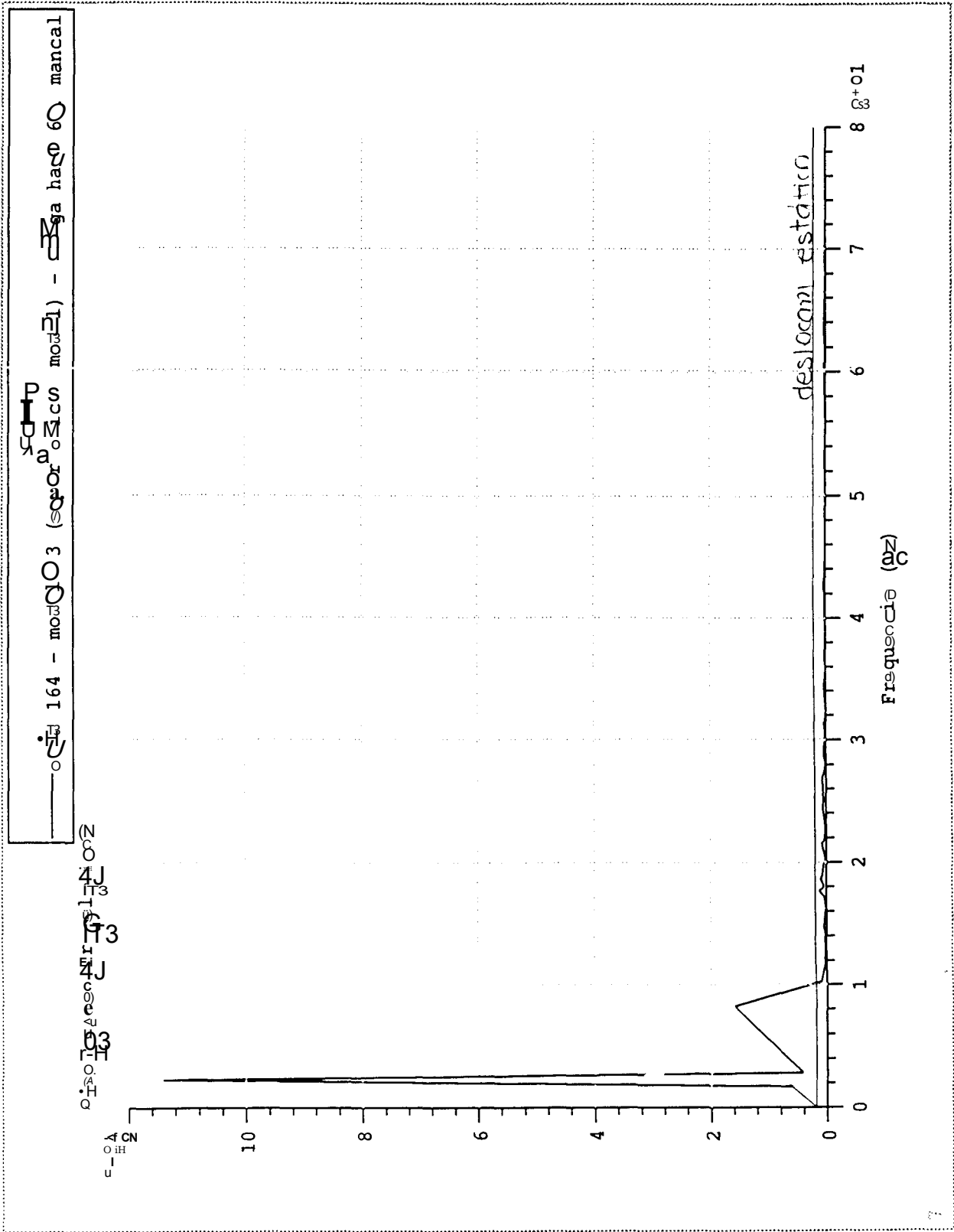


Figura 7.13 - Modelo 3 - Deslocamentos do 6o. mancal das turbinas, direção z.

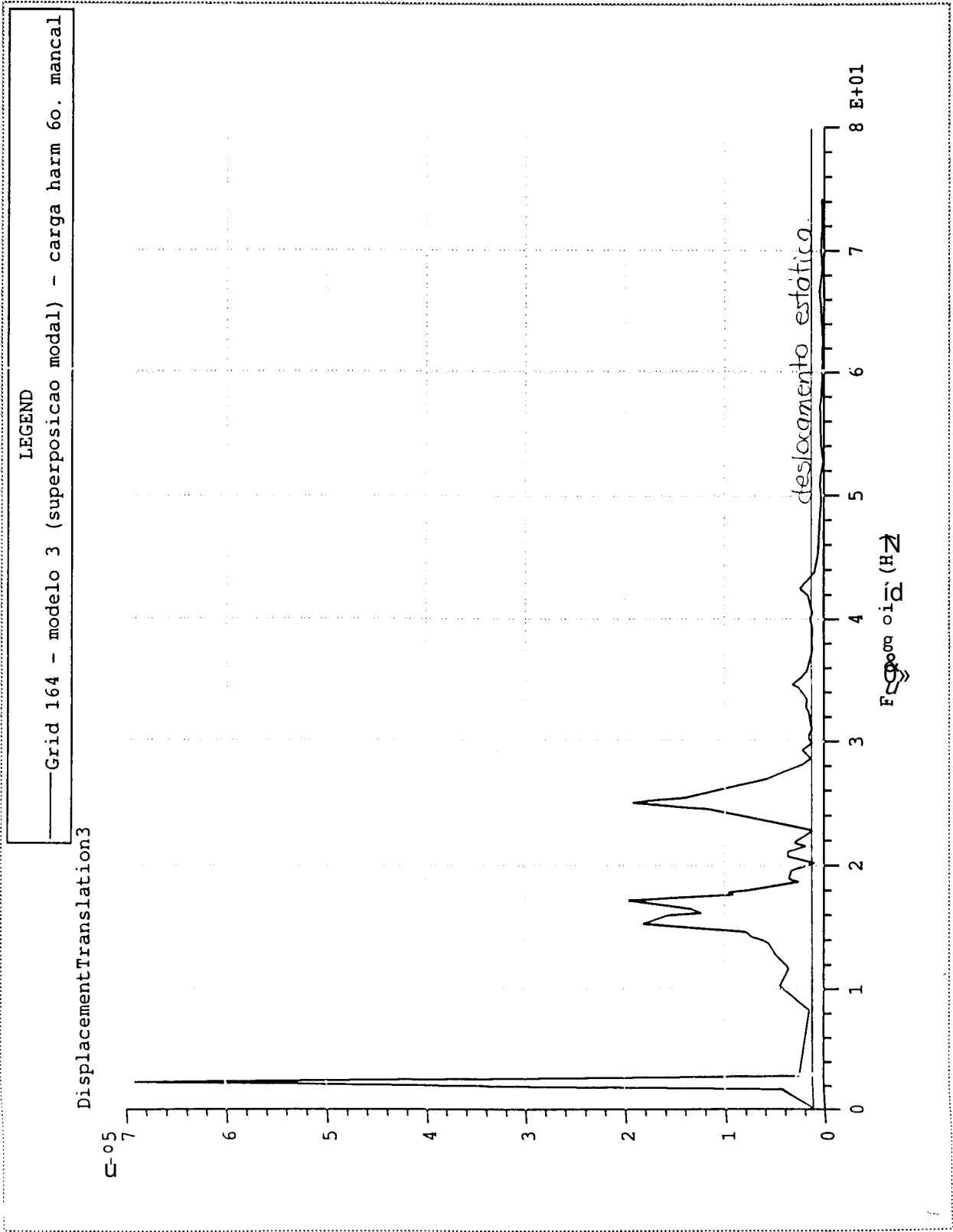


Figura 7.14 - Modelo 3 - Deslocamentos da 1a. sapata do gerador, direções x, y, z.

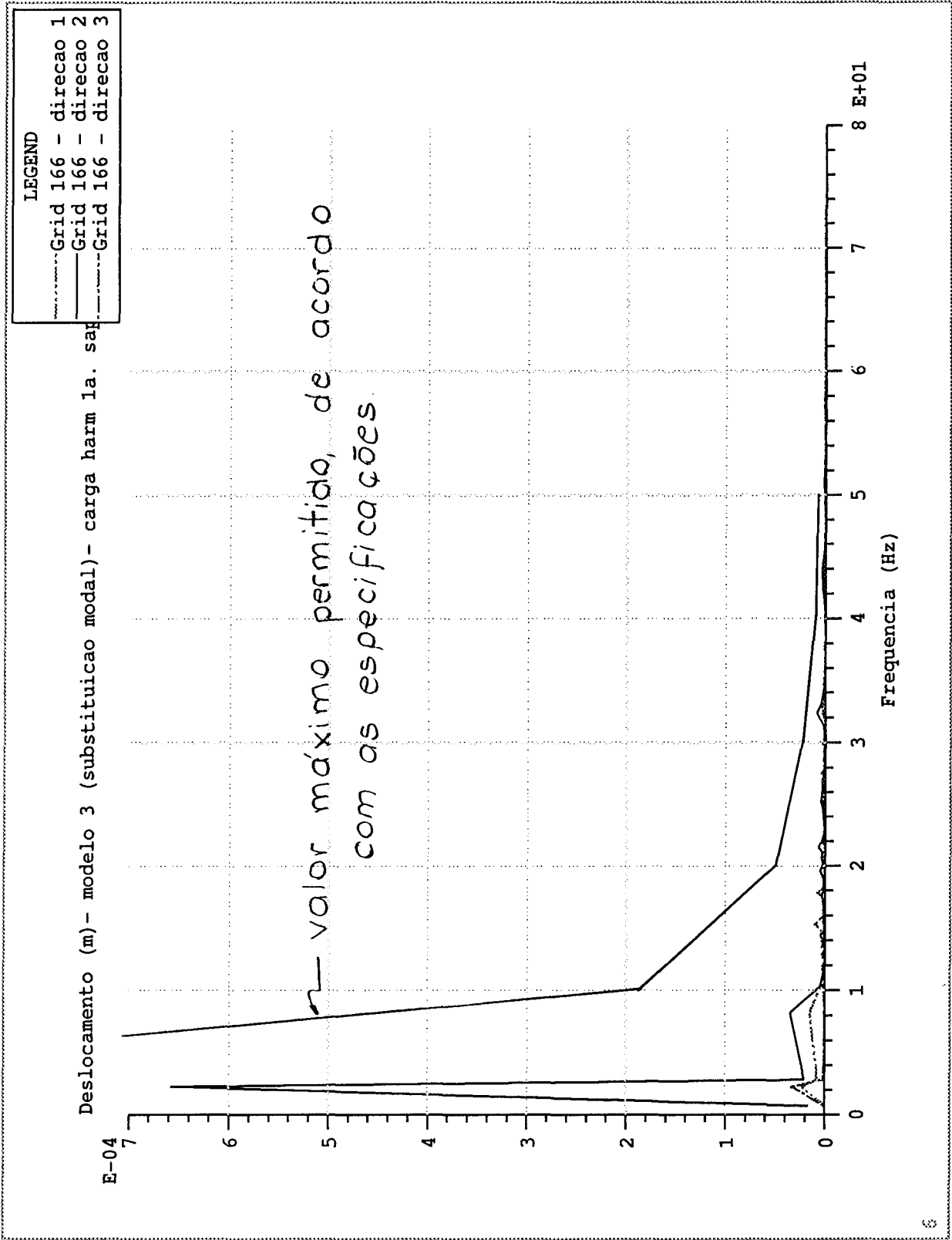


Figura 7.15 - Modelo 3 - Deslocamentos da 2a. sapata do gerador, direções x, y, z.

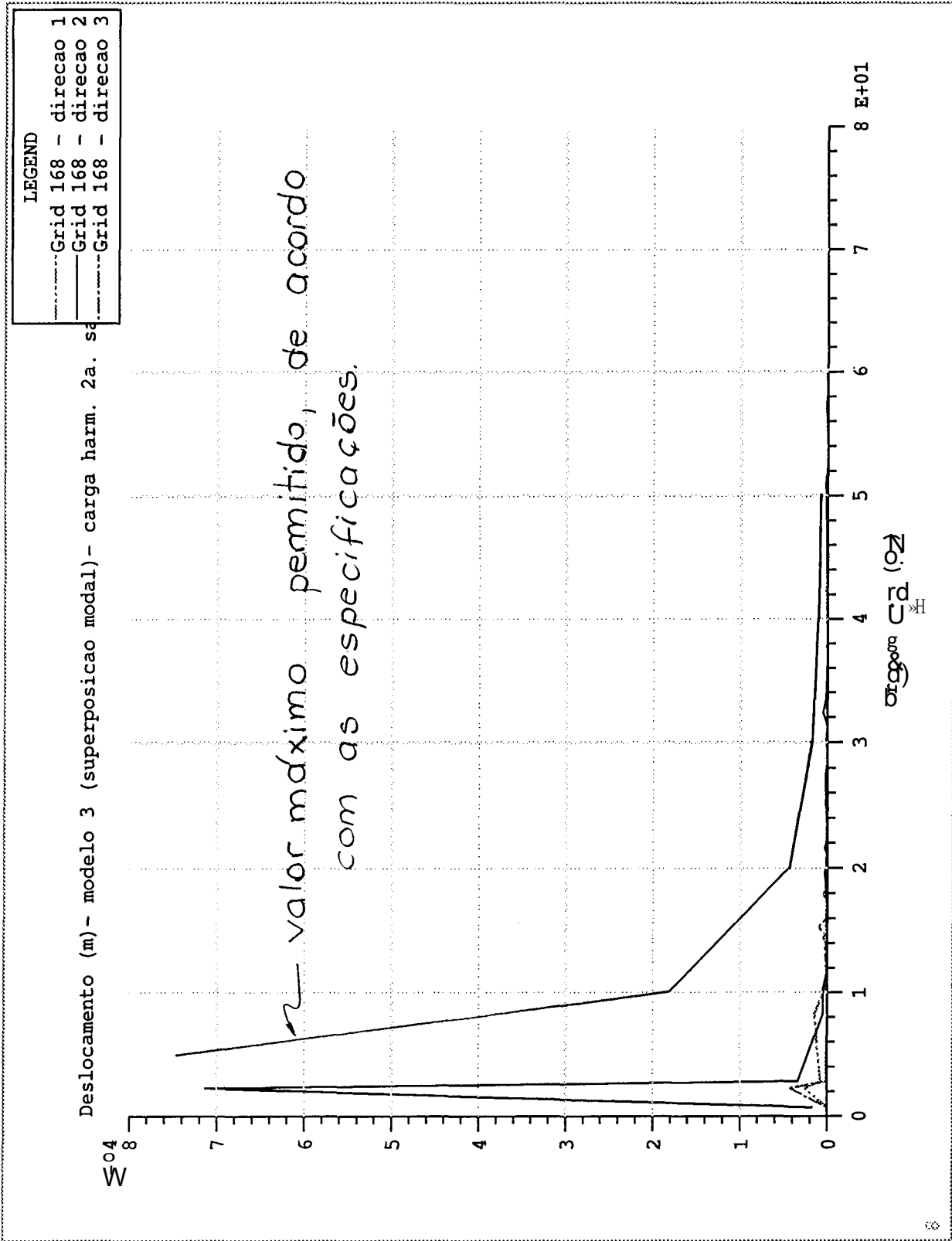


Gráfico das flexibilidades dinâmicas admissíveis nas sapatas do gerador

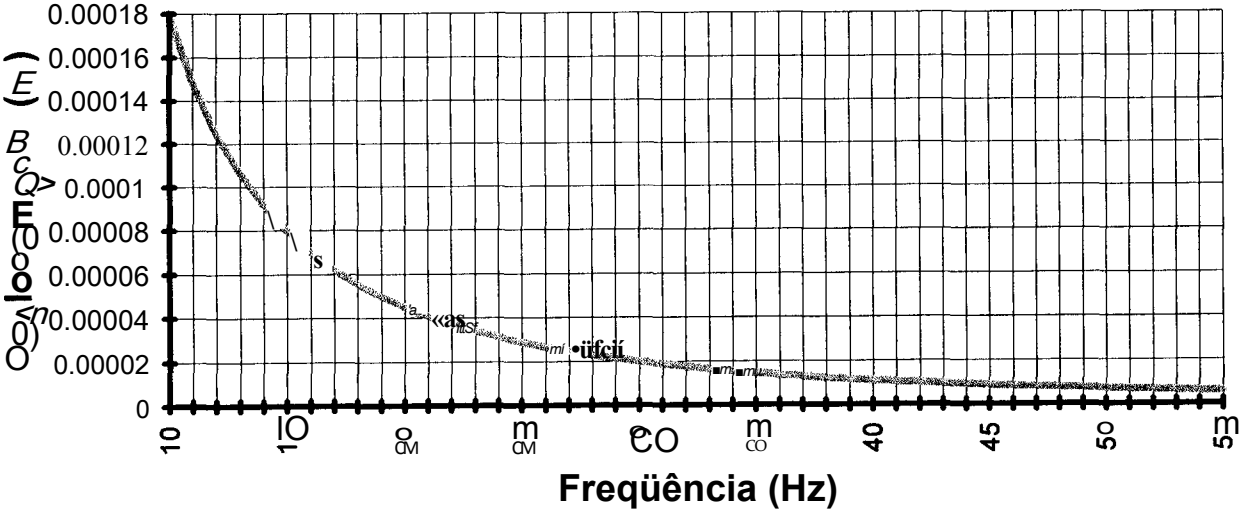


Figura 7.16 - Gráfico das flexibilidades dinâmicas admissíveis nas sapatas do gerador.

8 - Análise transiente

8.1- Procedimentos.

Este capítulo trata da resposta do cavalete às condições dinâmicas de emergência, que são as cargas transientes de curto-circuito trifásico, curto-circuito bifásico e sincronização fora-de-fase, especificadas pelas equações (3.1) a (3.3). Estão verificados os desalinhamentos entre os eixos da turbina de baixa pressão e do gerador, para cada uma das cargas transientes, de acordo com o especificado no capítulo 4, para o que foi necessário preparar uma rotina descrita em 8.3.

As respostas estão calculadas para intervalos de tempo de 0,005 s, que foi estabelecido por tentativas até que os gráficos dos deslocamentos se apresentassem com curvatura suave de tal forma que picos de resposta não fossem perdidos.

Da mesma forma que na análise no domínio da frequência, a análise transiente pôde ser feita direta para os modelos 1 e 2, enquanto que para o modelo 3, dado seu tamanho, houve necessidade de se usar redução modal. Para aferir se diferenças de resultados poderiam ser oriundas de perda de precisão da análise feita com redução modal, usou-se o modelo 2 como referência, executando-se o problema por ambos processos. As respostas foram idênticas.

- Procedimentos na análise transiente direta.

Na análise direta a equação dinâmica do movimento é dada por:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [B]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad (8.2)$$

sendo:

$[M]$ = matriz de massa;

$[B]$ = matriz de amortecimento;

$[K]$ = matriz de rigidez;

$\{u(t)\}$ = vetor de deslocamentos no tempo;

$\{P(t)\}$ = vetor de carga no tempo.

A resposta é obtida em tempos discretizados com um intervalo fixo Δt usando diferenças finitas centrais:

$$\{K\} = T^{\Delta t} K + I - U_{n-1} \quad (8.3)$$

$$\{\ddot{u}_n\} = -\frac{1}{\Delta t^2} \{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}\}$$

- Procedimentos na análise modal.

Um conjunto extra de pontos (U_e) é introduzido.

As coordenadas são transformadas de físicas em modais:

$$\{u\} = [\phi] \{4\} \quad (8.4)$$

Removendo o amortecimento temporariamente:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad (8.5)$$

Substituindo eq. (8.4) na eq. (8.5):

$$[M][\phi] \{\ddot{4}\} + [K][\phi] \{4\} = \{P(t)\} \quad (8.6)$$

Premultiplicando por $[\phi]^T$:

$$[\phi]^T [M] [\phi] \{\ddot{4}\} + [\phi]^T [K] [\phi] \{4\} = [\phi]^T \{P(t)\} \quad (8.7)$$

sendo:

$[\phi]^T [M] [\phi]$ = matriz de massa modal (diagonal);

$[\phi]^T [K] [\phi]$ = matriz de rigidez modal (diagonal);

$[\phi]^T \{P(t)\}$ = vetor de força modal.

A equação (8.6) pode ser escrita como um sistema de equações desacopladas de sistemas de um grau de liberdade:

$$m_j \ddot{4}_j + k_j 4_j = P_j(t) \quad (8.8)$$

onde:

m_j = j-ésima massa modal;

k_j = j-ésima rigidez modal;

P_j = j-ésima força modal.

Havendo amortecimento que não seja modal, supõe-se que a matriz **[B]** não seja diagonalizada por $[\phi]$, ou seja, $[\phi]^T [B] [\phi]$ não é diagonal. Neste caso o problema torna-se acoplado e é resolvido por integração numérica do tipo Newmark-Beta.

8.2 - Amortecimento.

A matriz de amortecimento para análise transiente no MSC/NASTRAN é composta de várias matrizes:

$$[B] = [B^1] + [B^2] + \alpha [K^1] + \beta [K^2] + \gamma [K^3] \quad (8.9)$$

onde:

$[B^1]$ = amortecimento dos elementos;

$[B'']$ = matriz diretamente introduzida + funções de transferência;

$G = 2\zeta$, = coeficiente global de amortecimento estrutural;

W_3 = frequência de interesse - rad/s (PARAM, W3);

$[K^*]$ = matriz de rigidez global;

G_E = coeficiente de amortecimento estrutural do elemento;

W_4 = frequência de interesse - rad/s (PARAM, W4);

$[K_E]$ = matriz de rigidez do elemento.

Repetindo o que já fora dito na análise no domínio da frequência, a determinação do amortecimento é tarefa difícil e manteve-se a escolha de amortecimento estrutural, com coeficiente $C = 0,01$.

8.3 - Aplicação das cargas e cálculo dos deslocamentos relativos no programa.

8.3.1 - Aplicação das cargas.

Para a aplicação das cargas transientes no programa MSC/NASTRAN, o comando que melhor se adequa é TL0AD2, que tem a forma;

$$p(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t < 0 \text{ ou } t < T_2 - T_j \\ A t e^{B \cos(2\pi F t + P)} & \text{para } t = t_i - x \end{cases} \quad (8.10)$$

sendo;

A = amplitude, definida em cartão DAREA

T = retardo

T_i, T₂ = constantes de tempo

F = frequência (Hz)

P = ângulo de fase (graus)

C = coeficiente exponencial

B = coeficiente de crescimento

Cargas transientes podem ser combinadas com o comando DLOAD, que gera uma carga combinação do tipo;

$$P_c = \sum_k S_c X S_k P_k \quad (8-11)$$

sendo;

S_c = fator de escala geral

S_k = fator de escala para a carga k (cartão TL0AD2)

?k = identificação (SID) da carga k (cartão TL0AD2)

As equações (3.1) a (3.3) definem torques aplicados pelo gerador ao cavalete sob condições de emergência cujas representações gráficas estão nas figuras 8.1 a 8.3

para os três casos respectivamente. Os torques (momentos) são divididos em dois binários iguais, comprimindo duas sapatas que se situam do mesmo lado do eixo e tracionando as duas sapatas opostas a elas em relação ao eixo. O braço de alavanca é a distância de 4,75 m entre as sapatas, conforme pode ser visto na figura 4.3.

Sob a ação de um torque T, em cada sapata do gerador atua a força P :

$$P = \frac{T}{2 \times 4,75} = 1,1053T$$

que tem sentido para cima em um dos lados do eixo e para baixo no outro.

São gerados 3 subcasos para aplicação das cargas transientes:

a) - 1o. subcaso - Torque devido a curto circuito trifásico [eq. (3.2)]:

Aplicando o carregamento no MSC/NASTRAN, tem-se 2 parcelas TL0AD2:

$$- 1a. \text{ parcela} = e^{-11,952t} = A t^B e^{Ct} \cos(27\ddot{u}Ft + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -11.952 \quad F = 0. \quad P = 0.$$

$$- 2a. \text{ parcela} = e^{-11,952t} \sin(1207ct) = e^{-11,952t} \cos(120n:t-90^\circ) = A t^B e^{Ct} \cos(2jiFt + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -11.952 \quad F = 60. \quad P = -90.$$

Combinando as cargas transientes, tem-se os coeficientes para o comando DLOAD:

$$Sc = 1.0922E6 \quad Si = 1.255 \quad S2 = 6.531$$

O conjunto de comandos para curto-circuito trifásico pode ser visto no quadro 8.2.

b) - 2o. subcaso - Torque devido a curto-circuito bifásico [eq. (3.2)]:

$$-1 a. \text{ parcela} = 1,425e^{-10,423t} = A t^B e^{Ct} \cos(2j\ddot{u}Ft + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -10.423 \quad F = 0. \quad P = 0.$$

- 2a. parcela =

$$6,731e^{-9,949t} \sin(120jrt) = 6,731e^{-9,949t} \cos(27t60t - 90^\circ) = A t^B e^{Ct} \cos(27\ddot{u}Ft + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -9,949 \quad F = 60. \quad P = -90.$$

- 3a. parcela =

$$-0,0757e^{j1207t} \cos(1207t) = -0,0757e^{j1207t} \cos(2j60t) = Ate^{j1207t} \cos(27iFt + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -6.671 \quad F = 60. \quad P = 0.$$

- 4a. parcela =

$$-3,272e^{j240Tt} \sin(240Tt) = -3,272e^{j240Tt} \cos(27cl20t - 90^\circ) = Ate^{j240Tt} \cos(2jtFt + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -6,669 \quad F = 120. \quad P = -90.$$

Combinando as cargas transientes, tem-se os coeficientes para o comando DLOAD:

$$Sc = 1.0922E6 \quad Si = 1.425 \quad S_2 = 6.731 \quad S_3 = -00757 \quad S_4 = -3.272$$

O conjunto de comandos para curto-circuito bifásico pode ser visto no quadro 8.3.

c) - 3o. subcaso - Torque devido à sincronização fora de fase [eq. (3.3)]:

$$-1 \text{ a. parcela} = 0,0788 = Ate^{j27iFt} \cos(27iFt + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = 0. \quad F = 0. \quad P = 0.$$

$$- 2a. \text{ parcela} = 3,7266 = Ate^{j27tFt} \cos(27tFt + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -10.475 \quad F = 0. \quad P = 0.$$

- 3a. parcela =

$$4,406e^{j120jtt} \sin(120jtt) = 4,406e^{j120jtt} \cos(27ü60t - 90^\circ) = Ate^{j120jtt} \cos(27üFt + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -12.627 \quad F = 60. \quad P = -90.$$

- 4a. parcela =

$$-2,679e^{j1207ct} \cos(1207ct) = -2,679e^{j1207ct} \cos(27ü60t) = Ate^{j1207ct} \cos(2jtFt + P)$$

com:

$$A = 1. \quad B = 0. \quad C = -12.627 \quad F = 60. \quad P = 0.$$

Combinando as cargas transientes, tem-se (comando DLOAD):

$$S_c = 1.0922E6 \quad S_i = .0788 \quad S_2 = 3.726 \quad S_3 = 4.406 \quad S_4 = -2.679$$

O conjunto de comandos para sincronização fora-de-fase está no quadro 8.4.

8.3.2 - Cálculo dos deslocamentos relativos entre os eixos da turbina de baixa pressão e do gerador.

- Rotação do eixo do gerador (ângulo Aae):
- Deslocamentos do \hat{p} - mancais do gerador (nós 166 e 167)

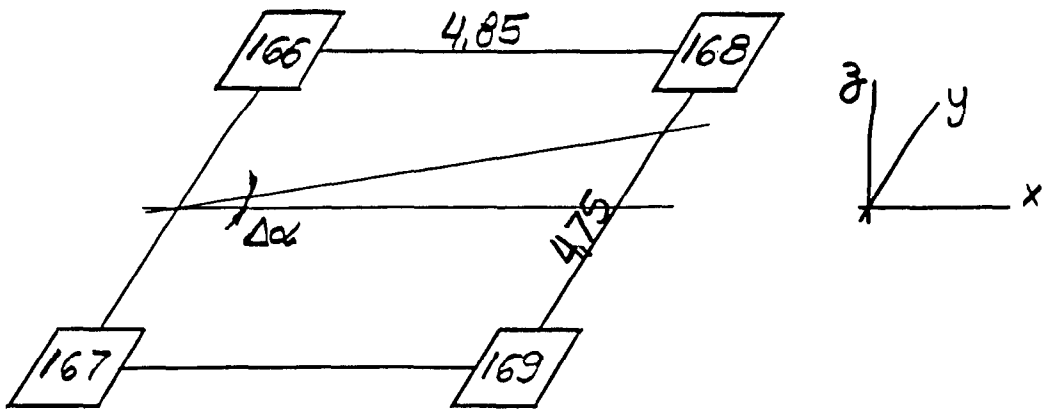


Figura 8.1 - Deslocamentos horizontais no gerador.

- Devidos aos deslocamentos horizontais:

$$DY1A = (Y_{166} + Y_{167})0,5$$

- Devidos aos deslocamentos verticais:

$$Y = \frac{Az}{\ell} = \frac{1}{4,75} (Z_{171} - Z_{170})$$

$$DY2A = Y(e + \frac{h}{2})$$

$$e = 1,135 \text{ m}$$

$$\frac{h}{2} = 1,378 \text{ m}$$

$$6 + 1 = 1,135 + 1,378 = 2,513 \text{ m}$$

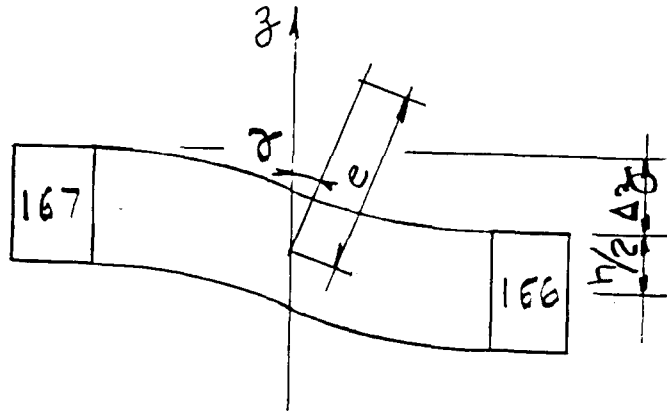


Figura 8.2 - Deslocamentos verticais no lo. mancais do gerador.

$$DY2A = -\frac{1}{4,75} (Z_{167} - Z_{166}) 2,513 = 0,529 (Z_{167} - Z_{166})$$

$$DYA = DY1A + DY2A = 0,5 (Y_{166}) + 0,5 (Y_{167}) + 0,529 (Z_{167}) - 0,529 (Z_{166})$$

- Deslocamentos no 2º mancal do gerador (nós 168, 169):

$$DYB = 0,5(Y168) + 0,5(Y169) + 0,529(Z169) - 0,529(Z168)$$

- Ângulo de rotação:

$$Attg = \frac{DYB - DY A}{4,85} =$$

$$Aac = 0,103(Y168 + Y169) + 0,109(Z169 - Z168) - 0,103(Y166 + Y167) - 0,109(Z167 - Z166)$$

- Rotação do eixo da turbina de baixa pressão (ângulo Aab).

$$e = 1,135 \text{ m}$$

$$\frac{h}{2} = 1,378 \text{ m}$$

O procedimento é idêntico.

- Deslocamento do 5º mancal das turbinas (nós 162 e 163).

- Devidos aos deslocamentos horizontais:

$$DY1A = (Y162 + Y163)0,5$$

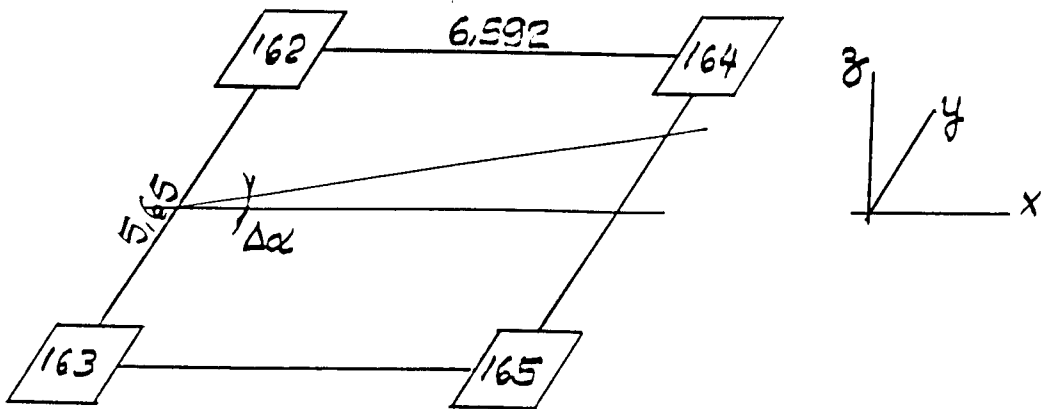


Figura 8.3 - Deslocamentos liorizontais na turbina de baixa pressão.

- Devidos aos deslocamentos verticais:

$$DY2A = Y(e + y)^H$$

$$y = (Z163 - Z162) \frac{1}{5,65}$$

$$DY2A = \frac{1,135 + 1,378}{5,65} (Z163 - Z162) = 0,445(Z163 - Z162)$$

$$DYA = 0,5(Y162 + Y163) + 0,445(Z163 - Z162)$$

- Deslocamento do 6º mancai (nós 164 e 165).

$$DYB = 0,5(Y164 + Y165) + 0,445(Z165-Z164)$$

- Ângulo de rotação;

$$Attb = \frac{DYB - DYA}{6,592}$$

$$Attb = 0,076(Y164 + Y165) - 0,068(Z165-Z168) - 0,076(Y162-Y163) - 0,068(Z163+Z162)$$

- Cálculo da rotação relativa:

$$Aoti = Aag - Aajj$$

$$Aai = 0,103(Y168 + Y169) + 0,109(Z169 - Z168) - 0,103(Y166 + Y167) - 0,109(Z167-Z166) - 0,076(Y164 + Y165) - 0,068(Z165-Z164) + 0,076(Y162 + Y163) + 0,068(Z163 - Z162)$$

O sistema NASTRAN permite o cálculo automático dos deslocamentos relativos com a utilização dos “Multi-point Constraint” (MPC - ver quadro 8.5), que usa a expressão:

$$EA_j \cdot U_j = 0 \quad (8.12)$$

onde; u_j = grau de liberdade c_j no ponto G_j ;

C_j = número de componente;

G_j = número de identificação de nó (grid) ou ponto escalar;

A_j = coeficiente.

8.4 - Apresentação dos resultados.

As respostas da análise transiente, da mesma forma que na análise no domínio da frequência, estão apresentadas graficamente. Para cada carga transiente estão plotados os gráficos; torque/tempo aplicado; deslocamentos/tempo nas direções X, Y, Z para a 1ª sapata do gerador (nó 166); deslocamentos relativos /tempo entre os eixos da turbina de baixa pressão e do gerador.

8.5 - Análise dos resultados.

As especificações técnicas não estabelecem valores limites para o desalinhamento do eixo da turbina de baixa pressão com o do gerador. O procedimento previsto para o caso da Usina Jacuí I é enviar os resultados da análise para o fabricante do gerador que opina sobre sua aceitabilidade. Entretanto, de posse dos valores constantes no documento “JACUI THERMAL POWER PLANT - TURBINE GENERATOR FOUNDATION - STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS - TECHNICAL REPORT - PART 1”, no qual a máxima deflexão encontrada foi $1,4 \times 10^{-4}$ rad.

constata-se que as respostas estão abaixo daquele valor e podem ser aceitas como adequadas.

8.6 - Comparação dos resultados.

Os valores dos deslocamentos na primeira sapata não são especificados para atender os critérios de verificação mas foram escolhidos para aferir divergências entre os modelos. Os valores máximos obtidos para cada carga transiente e para cada modelo estão apresentados na tabela 8.1, de forma que se possam comparar resultados, na mesma direção e para o mesmo caso de carga, nos três modelos. O tratamento estatístico é o mesmo da análise no domínio da freqüência e encontrou-se o índice de variação 33,2% que, como na análise no domínio da freqüência, é maior do que o esperado, em torno de 10%.

Nas figuras 8.23 a 8.25 estão os gráficos comparativos dos deslocamentos nos três modelos. Sua observação mostra que os deslocamentos dos modelos 2 e 3, com fundação em estacas modelada por molas, são razoavelmente concordantes e que o modelo 1, com engaste rígido ao nível do topo do bloco, apresenta resultados notadamente menores para respostas na direção Y. Tais diferenças podem ser atribuídas à modelagem da fundação pois a rigidez do cavalete é pouco influenciada por ela para deslocamentos verticais e longitudinais, mas extremamente sensível para deslocamentos transversais e os obtidos para o modelo 1, mais rígido, são menores.

Tabela 8.1 - Comparação dos deslocamentos máximos para análise transiente nos três modelos.

TIPO DE	DIR.	DESLOCAMENTO MÁX.(m)				DESVIO-	COEFIC. DE
CARGA		MOD. 1	MOD. 2	MOD. 3	MEDIA	PADRÃO	VARIAÇÃO
		u	u	u	(ü)	(°)	(%)
CURTO	1	1.70E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.63333E-04	5.77350E-06	0.035347976
CIRCUITO	2	1.70E-04	7.40E-04	8.10E-04	5.73333E-04	3.51046E-04	0.612289632
TRIFÁSICO	3	5.60E-04	5.40E-04	6.30E-04	5.76667E-04	4.72582E-05	0.08195056
CURTO	1	2.00E-04	1.90E-04	1.90E-04	1.93333E-04	5.77350E-06	0.029862945
CIRCUITO	2	2.00E-04	9.00E-04	1.00E-03	0.00007	4.35890E-04	0.622699849
BIFÁSICO	3	6.40E-04	6.80E-04	7.90E-04	7.03333E-04	7.76745E-05	0.110437727
SINCRONIZ.	1	3.80E-05	4.40E-04	3.50E-04	0.0000276	2.10969E-04	0.764381131
FORA DE	2	4.80E-04	2.30E-03	2.50E-03	0.000176	0.000111301	0.632394276
FASE	3	1.20E-03	1.25E-03	1.44E-03	0.000129667	1.26623E-04	0.097652545
						SOMA =	2.98701664
						MÉDIA =	0.331890738

8.7 - Constatações.

Existem vários processos para avaliação da rigidez de estacas, ou grupos de estacas, com enfoques distintos e sua escolha vai depender do conhecimento e preferências pessoais do analista. Então, em outras situações, mesmo supondo que o analista vai obrigatoriamente modelar a fundação em estacas esperam-se variações nas respostas, porém, menor do que a encontrada neste trabalho.

Apesar de que apenas 3 modelos tenham sido desenvolvidos neste trabalho, constata-se que as respostas podem variar consideravelmente entre eles. Um estudo com universo maior e a comparação com resultados de ensaios na estrutura real são desejáveis para uma aferição mais conclusiva.

Quadro 8.1 - Sintaxe para aplicação de cargas transientes com TLOAD2 e DLOAD.

Cartão DLOAD:					
DLOAD SID	Sc	S,	PI S2	P2	etc.
Cartão TL0AD2:					
TL0AD2 SID	A	x	TYPE Ti	T2	F P
C	B				

SID = número identificador do comando; TYPE quando em branco define força ou momento.

Quadro 8.2 - Curto-circuito trifásico - Comandos para aplicação de carga transiente.

SUBCASE 1						
DLOAD = 104						
TSTEP= 11						
.....						
TLOAD2	111	120		0.	5.	0. 0. +
+	-11.952	0.				
.....						
TLOAD2	112	120		0.	5.	60. -90. +
+	-12.751	0.				
\$						
DLOAD	104	1.092E6	1.255	111	6.531	112
\$						
DAREA	120	166	3	0.1053		
DAREA	120	168	3	0.1053		
DAREA	120	167	3	-0.1053		
DAREA	120	169	3	-0.1053		
TSTEP	11	500	.005	1		

Quadro 8.4 - Sincronização fora-de-fase - Comandos para aplicação de carga transiente.

DLOAD	304	L092E6	0.0788	311	3.726	112	4.406	313	+
+	-2.679		314						
DAREA	120		166	3	0.1053				
DAREA	120		168	3	0.1053				
DAREA	120		167	3	-0.1053				
DAREA	120		169	3	-0.1053				
TSTEP	11		500	.005	1				

Quadro 8.5 - Comandos para determinação dos deslocamentos relativos entre eixos turbina/gerador.

Sintaxe para o programa:						
MPC SID	G1	CI	AI	G2	C2	A2
	G3	C3	A3	etc.		
cujos valores são:						
	168	2	-0,103	169	2	-0,103
	169	3	-0,109	168	3	0,109
	166	2	0,103	167	2	0,103
	167	3	0,109	166	3	-0,109
	164	2	0,076	165	2	0,076
	165	3	0,068	164	3	-0,068
	162	2	-0,076	163	2	-0,076
	163	3	-0,068	162	3	0,068

Figura 8.4 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Gráfico torque/tempo.

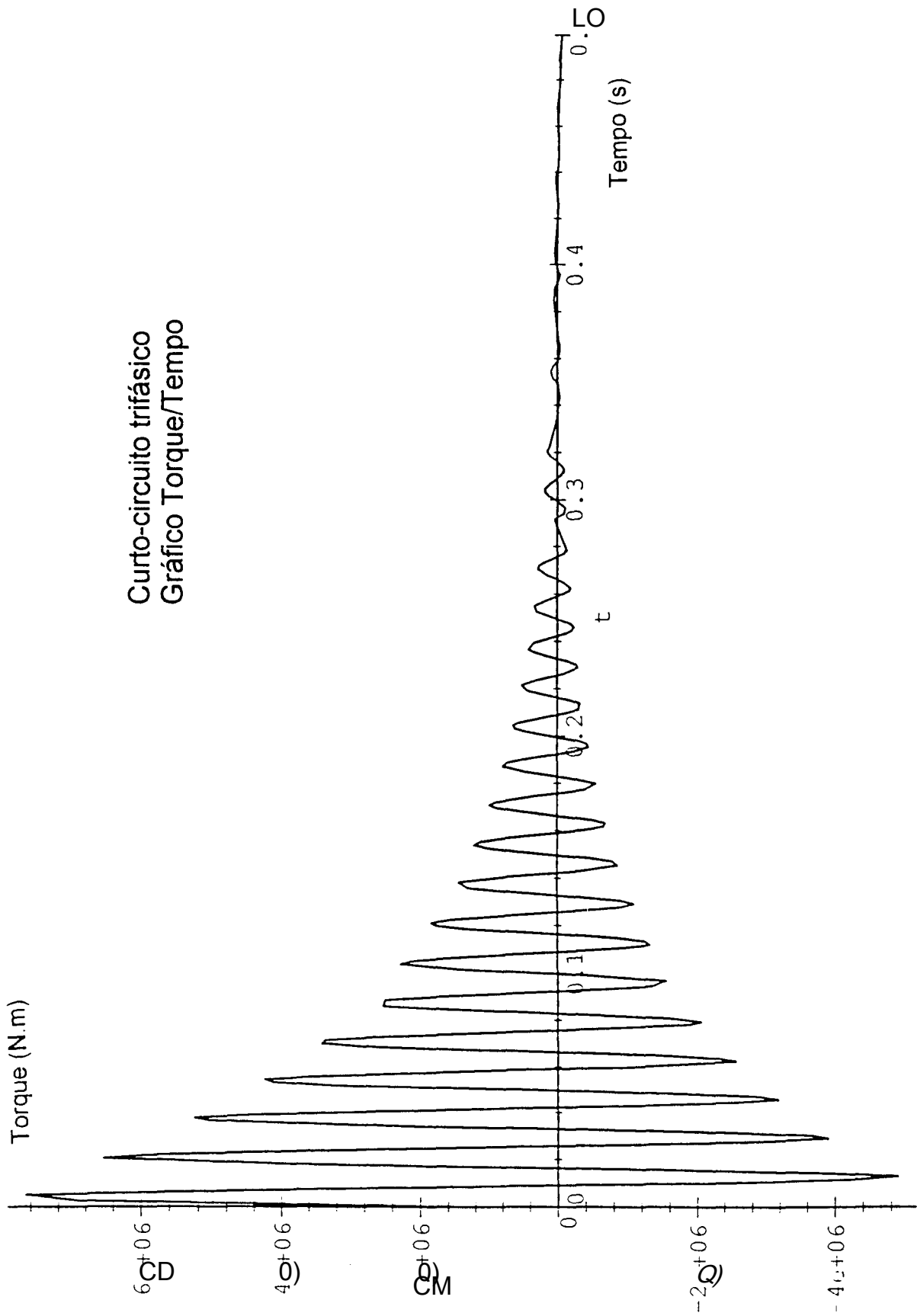


Figura 8.5 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

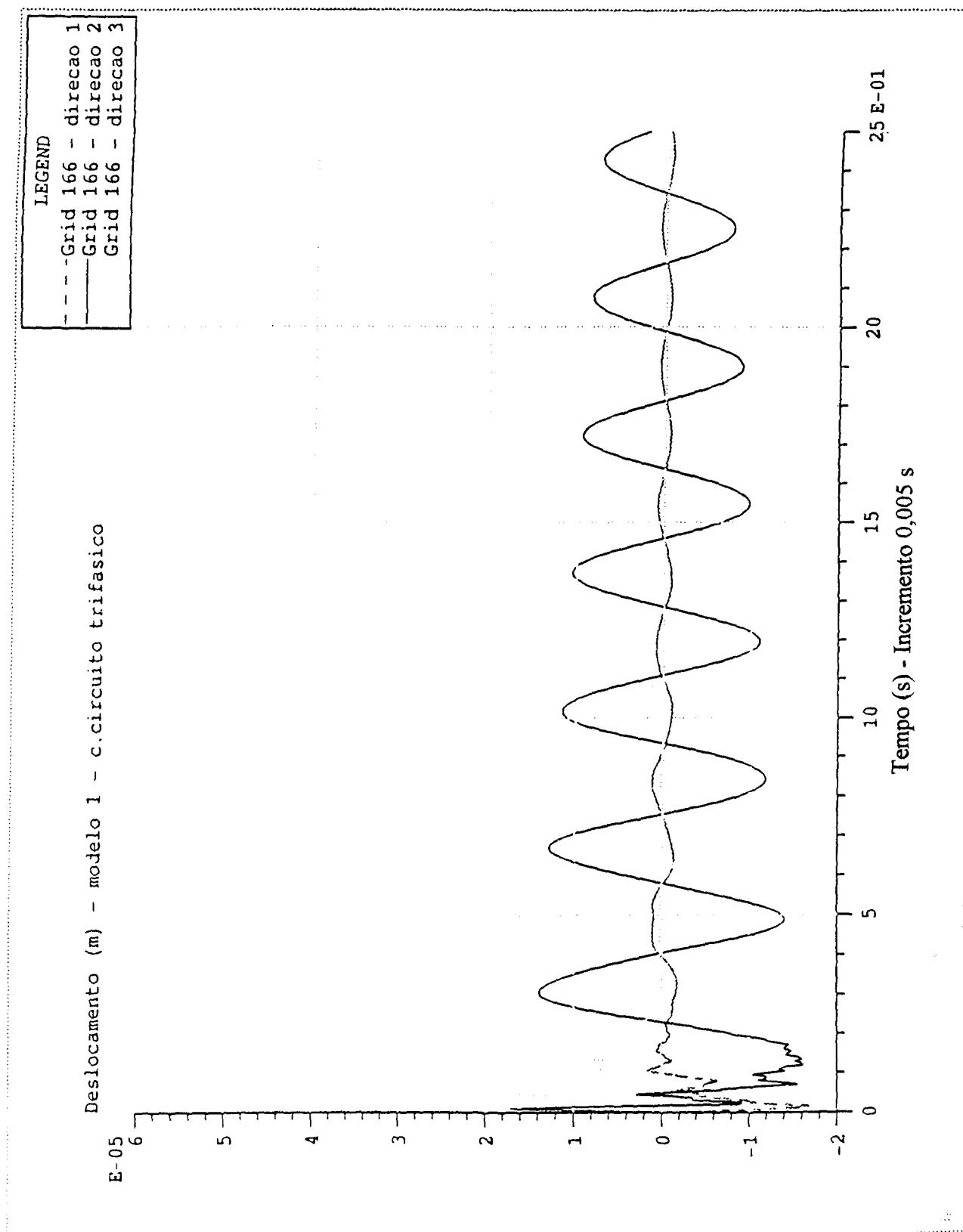


Figura 8.6 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.

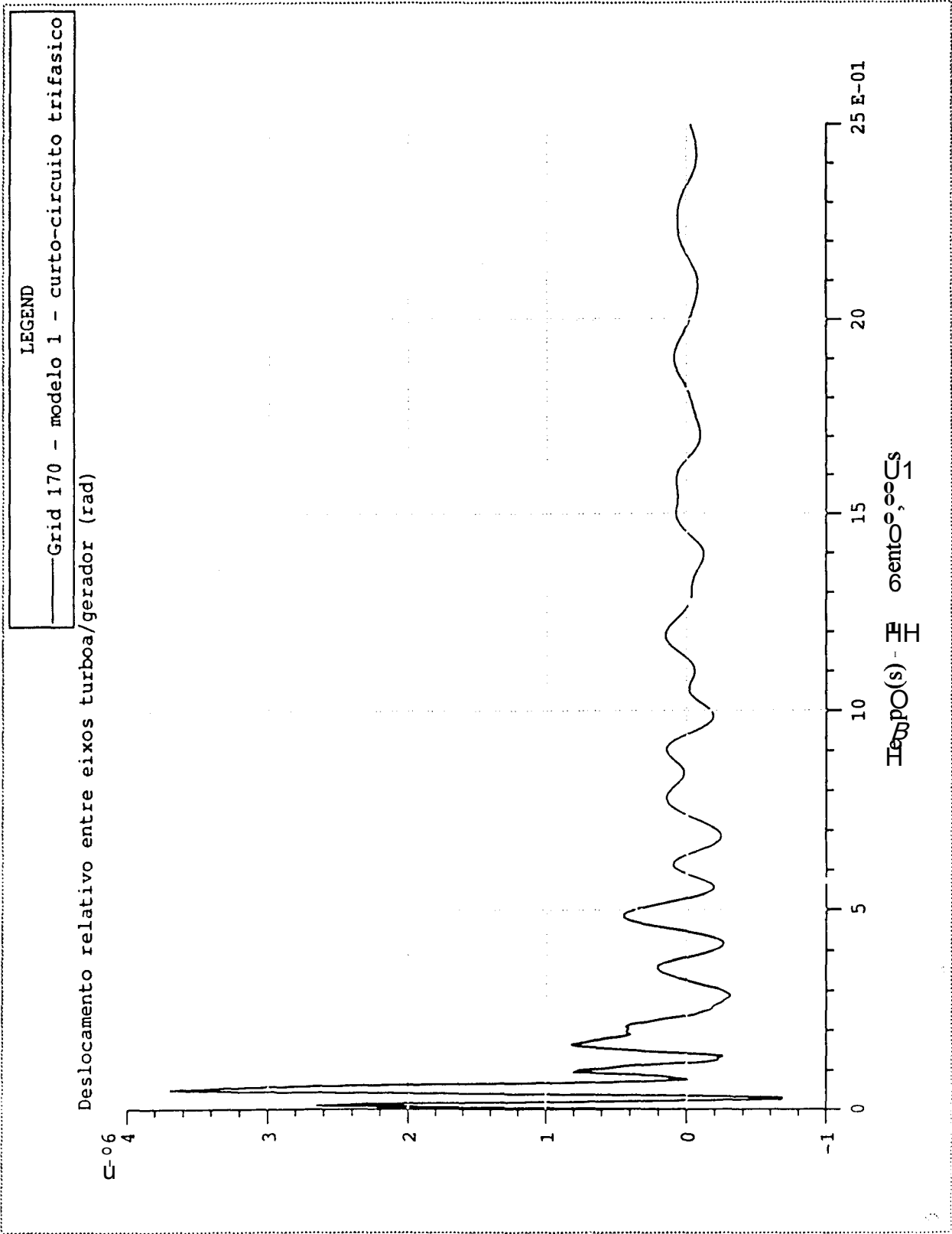


Figura 8.7- Modelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - D^locamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

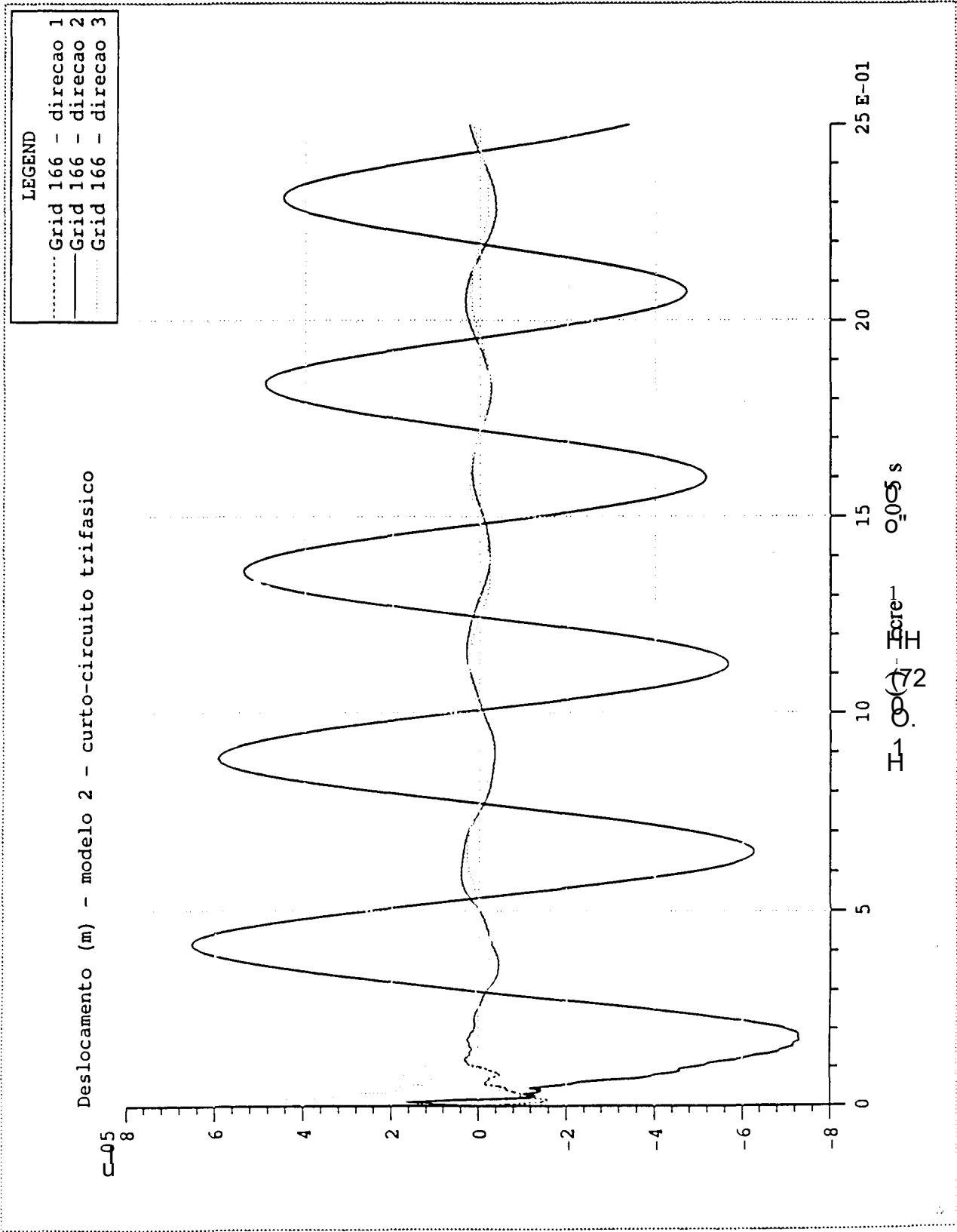


Figura 8.8 - Modelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.

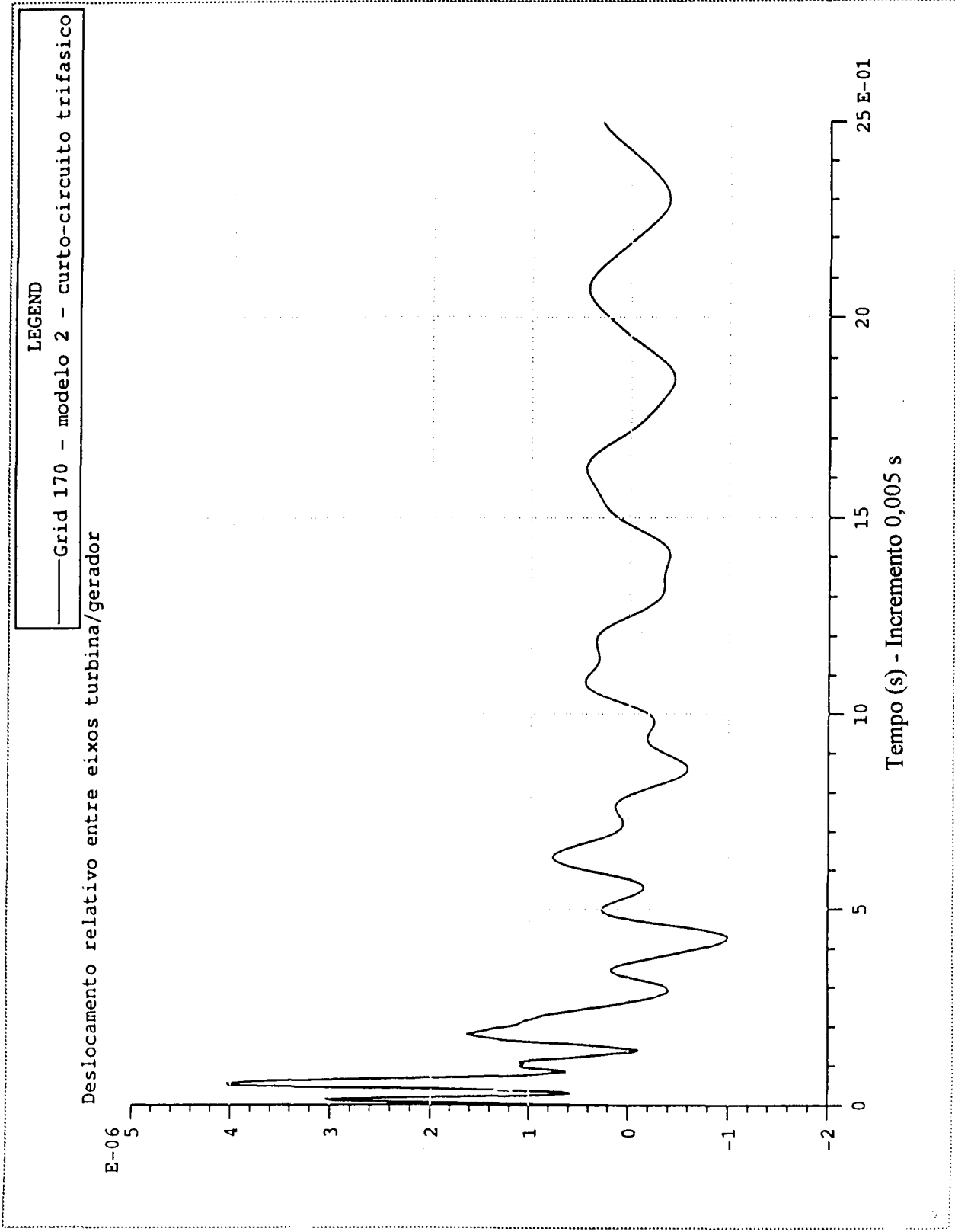


Figura 8.9 - Modelo 3 - Análise transiente - Curto-circuito trifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

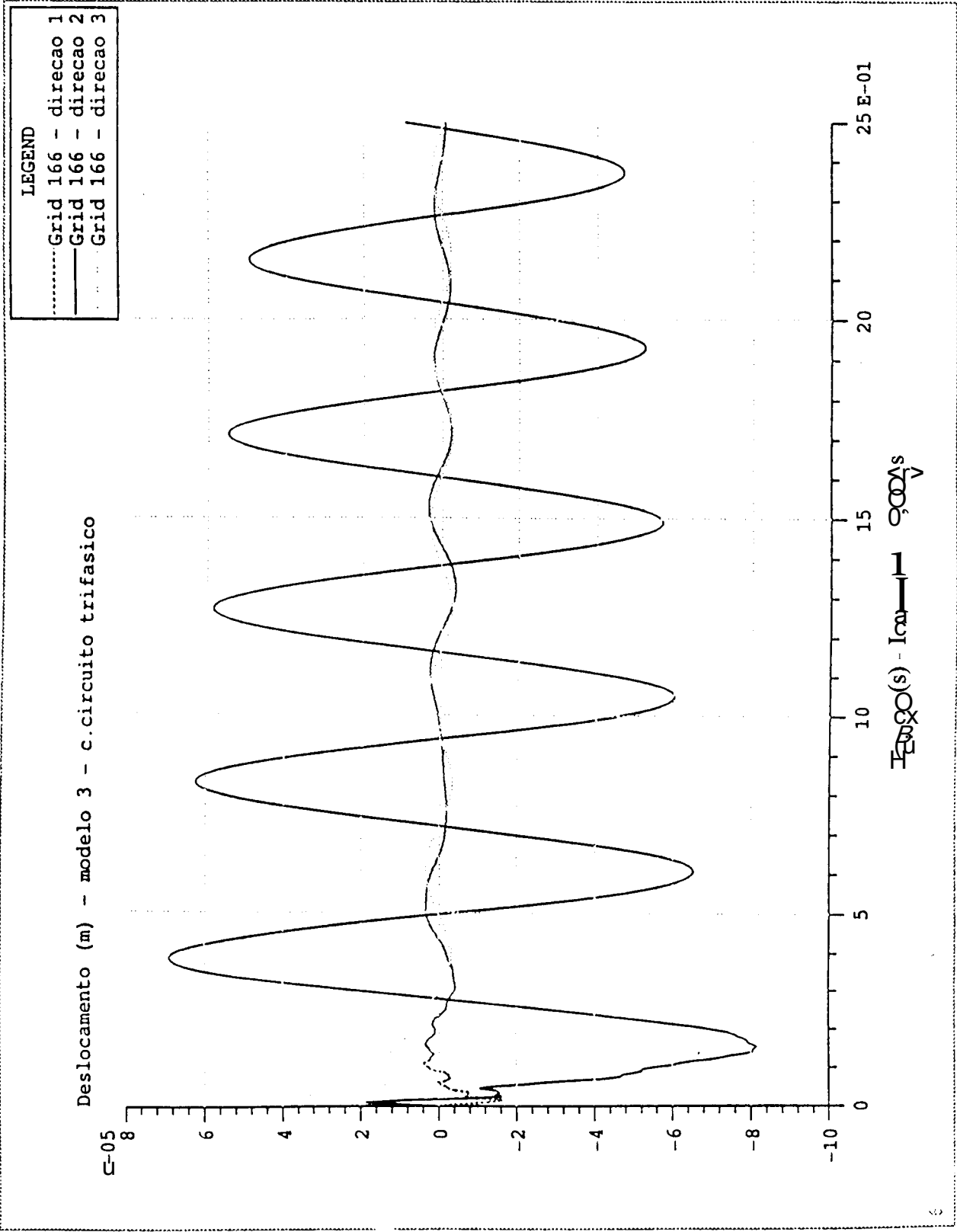


Figura 8.10 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Gráfico torque/tempo.

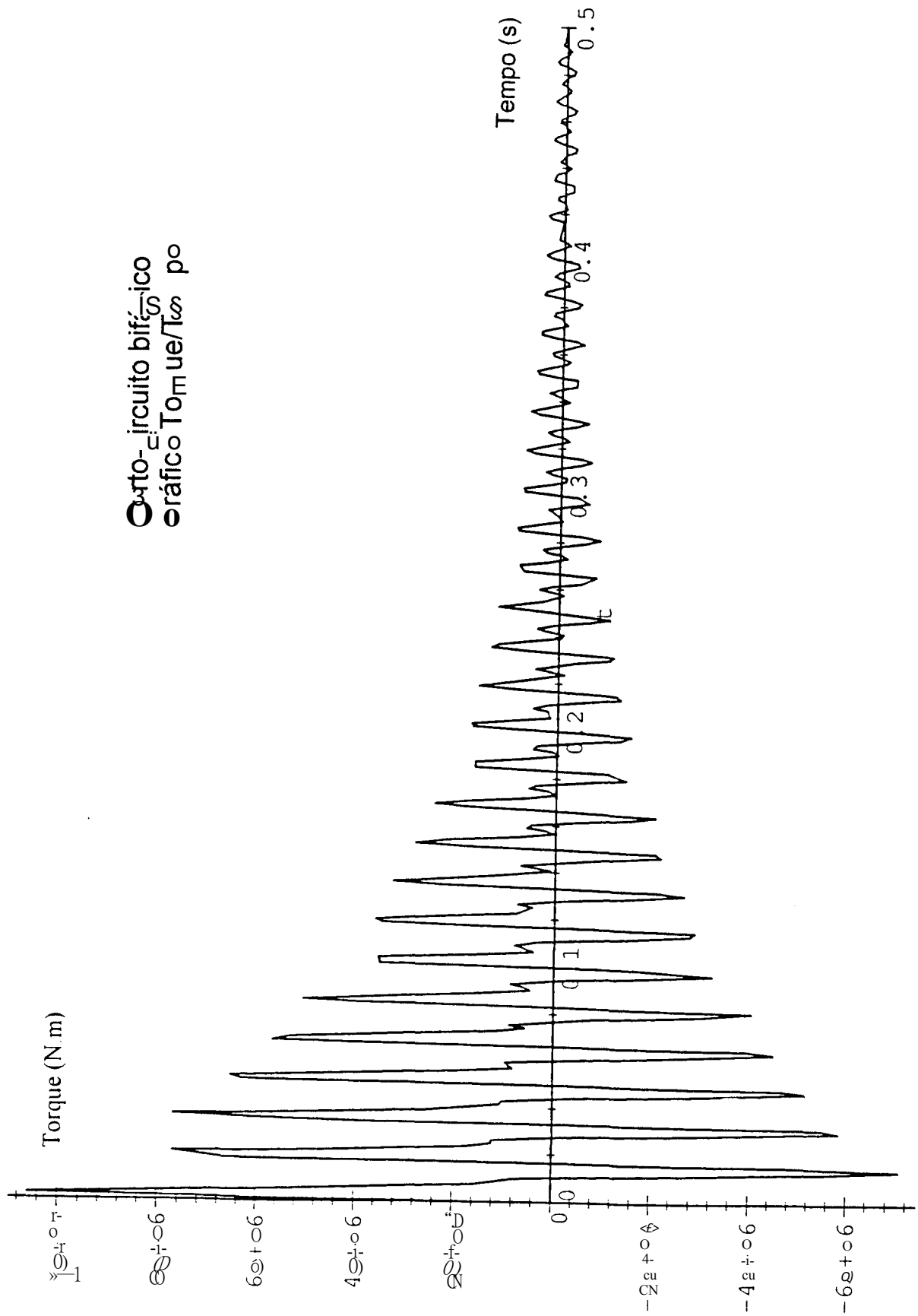


Figura 8.11 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

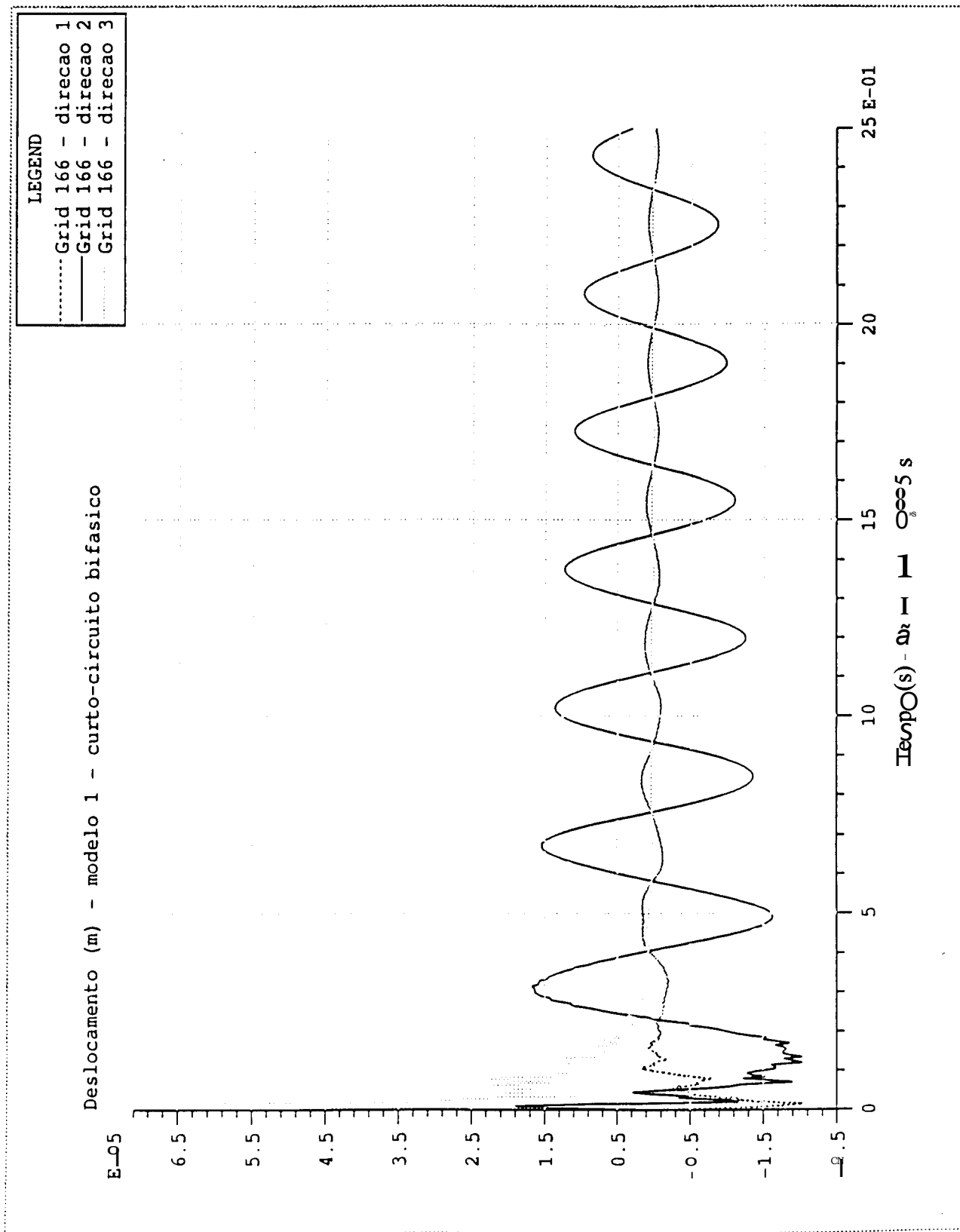


Figura 8.12 - Modelo 1 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.

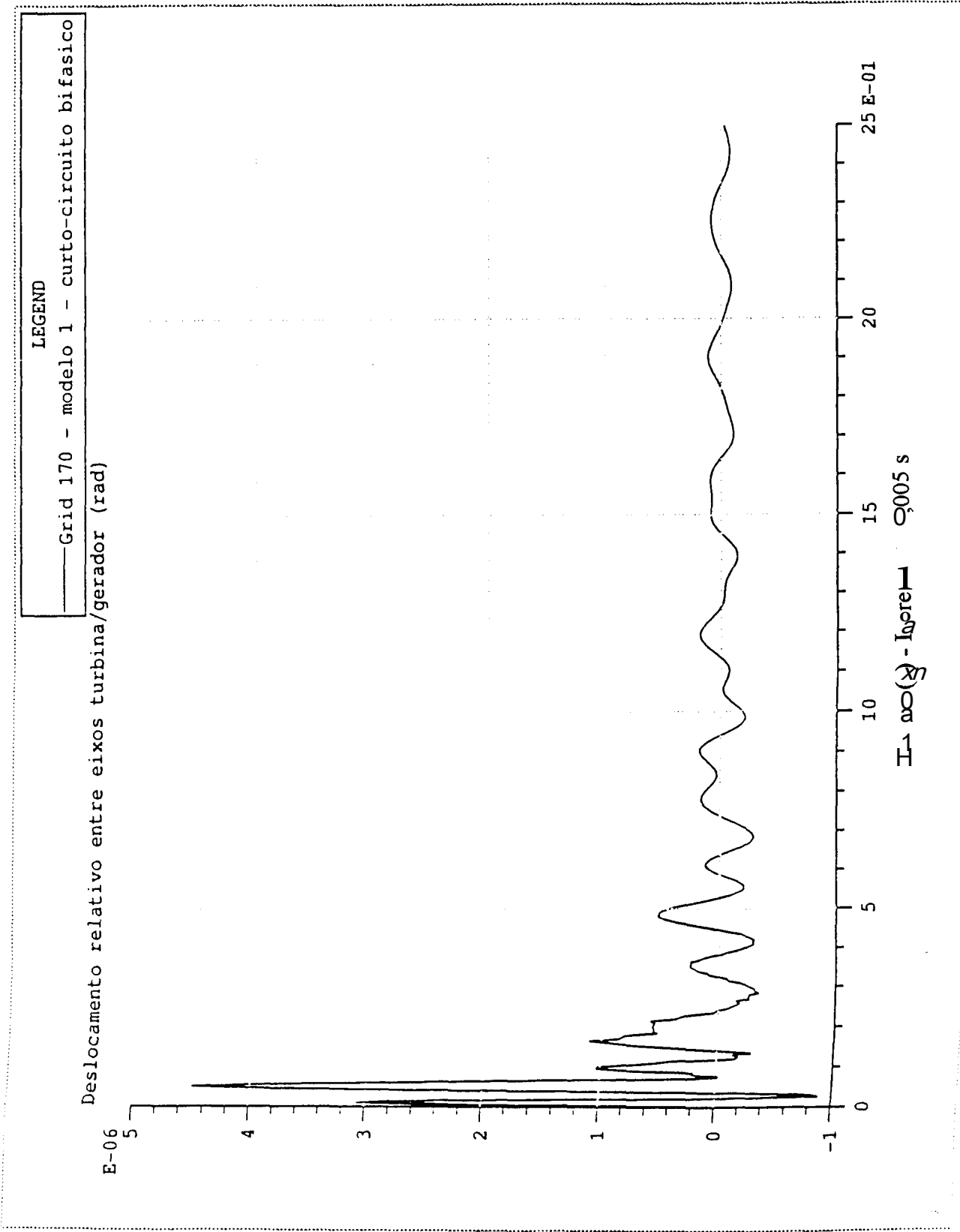


Figura 8.13 - IVlodelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

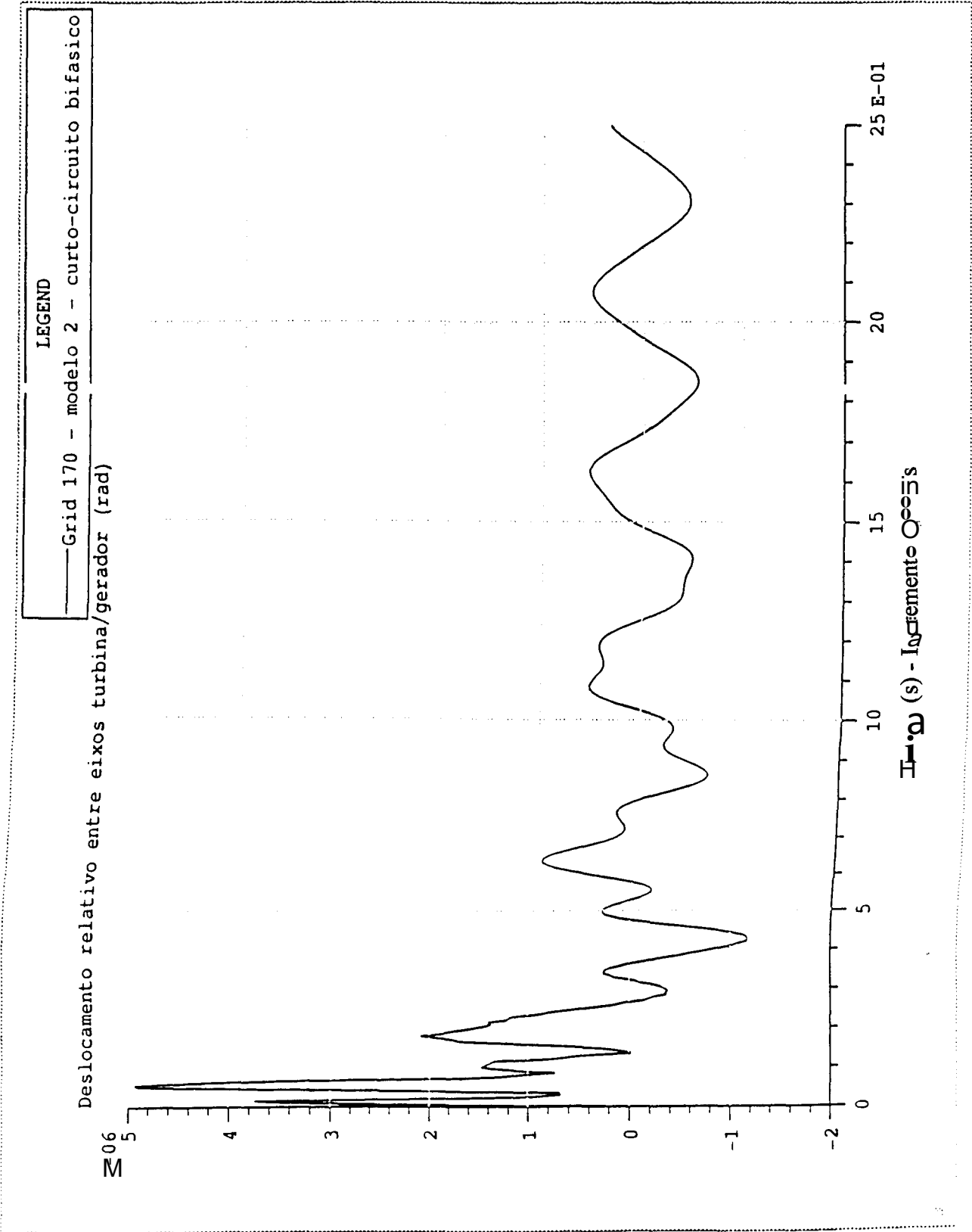


Figura 8.14 - IVModelo 2 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.

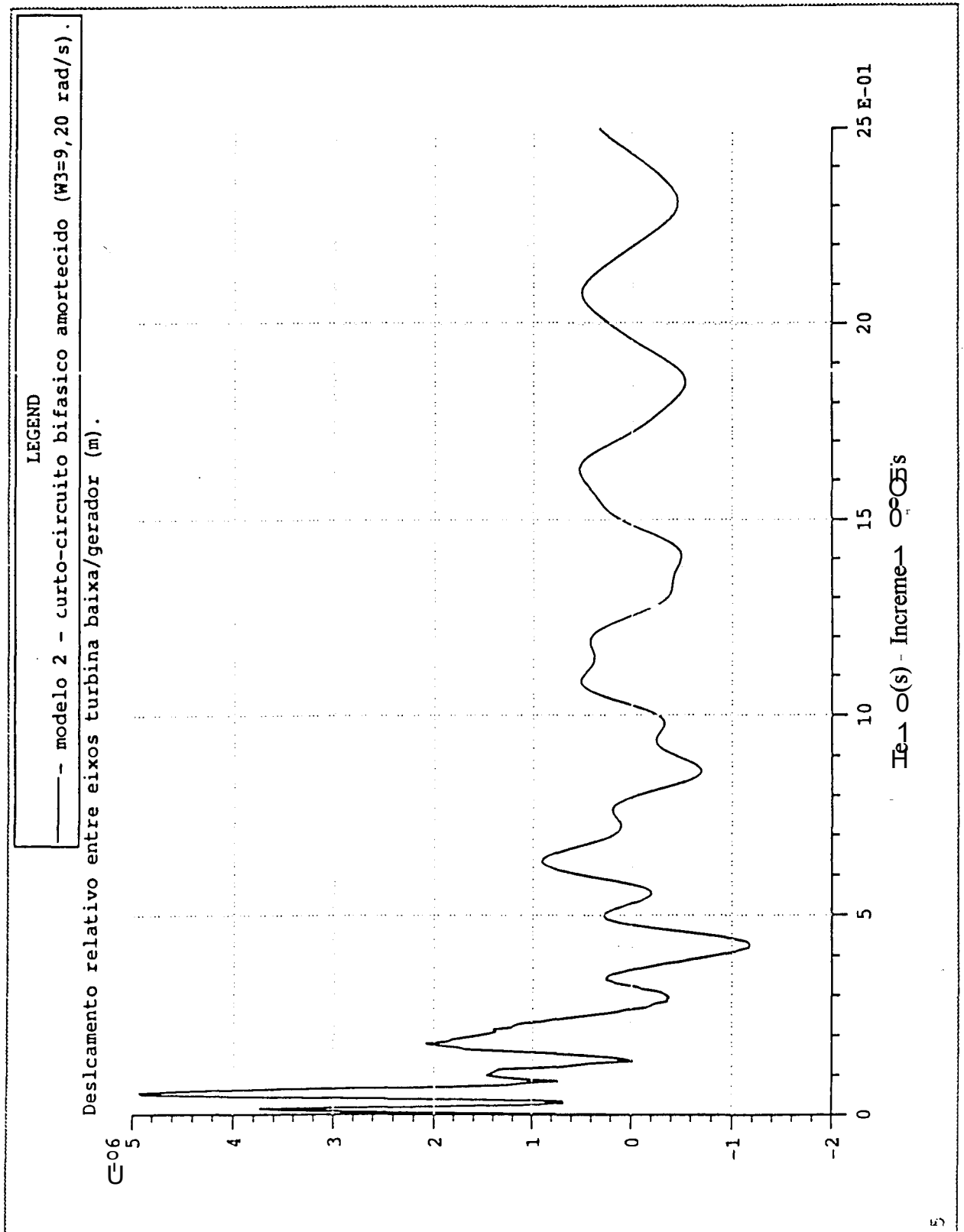


Figura 8.15 - IVlodelo 3 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

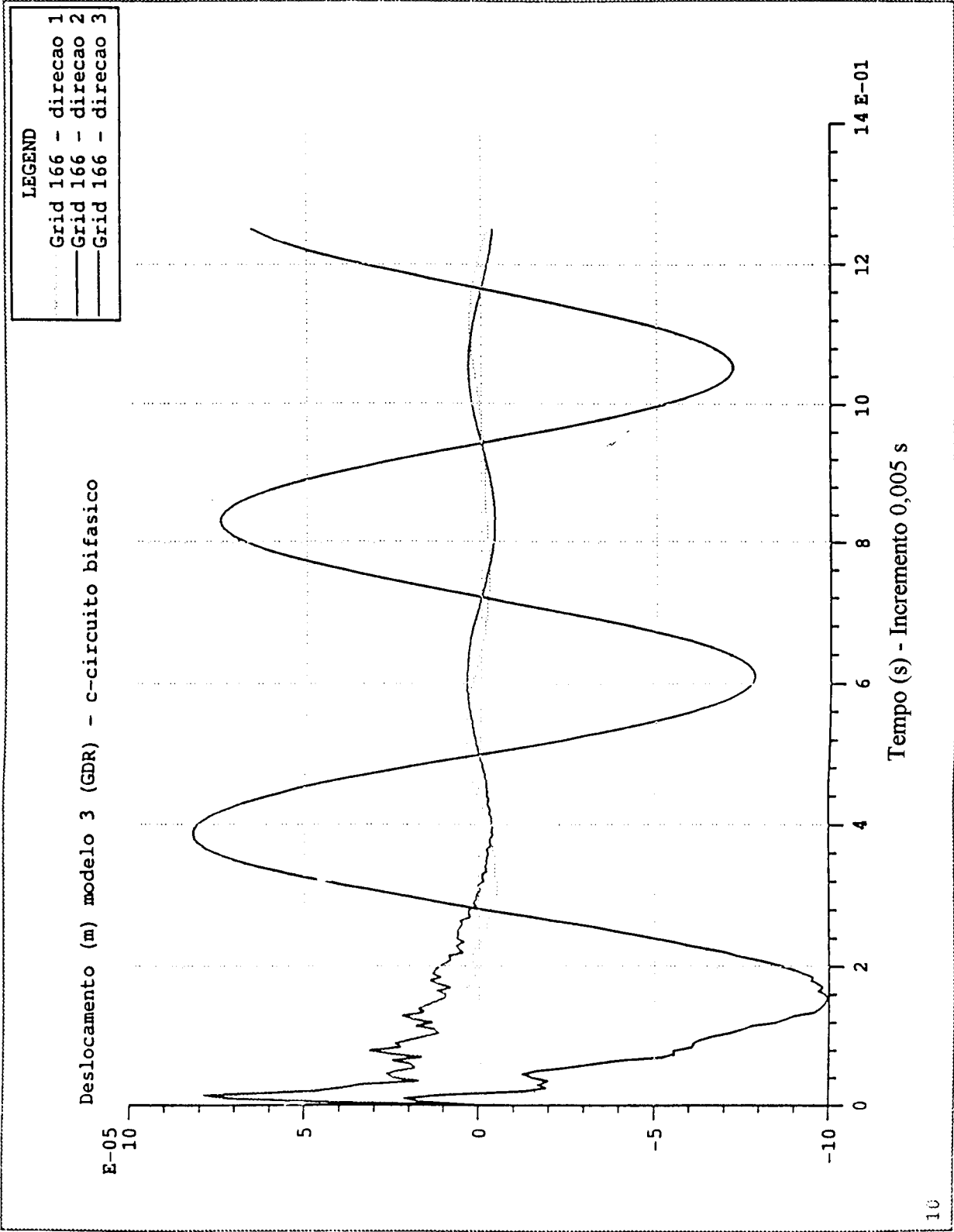


Figura 8.16 - !Modelo 3 - Análise transiente - Curto-circuito bifásico - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.

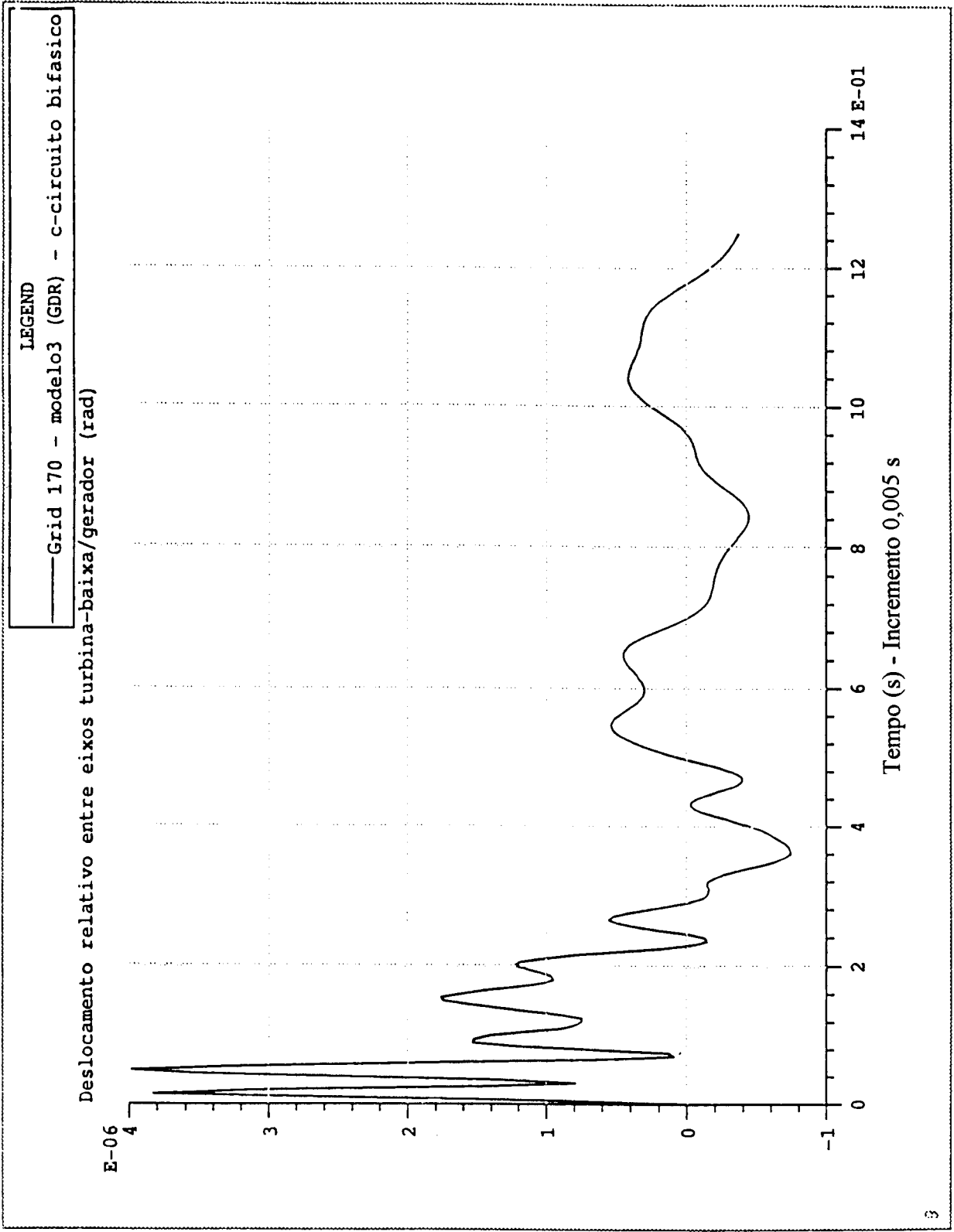


Figura 8.17 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Gráfico torque/tempo.

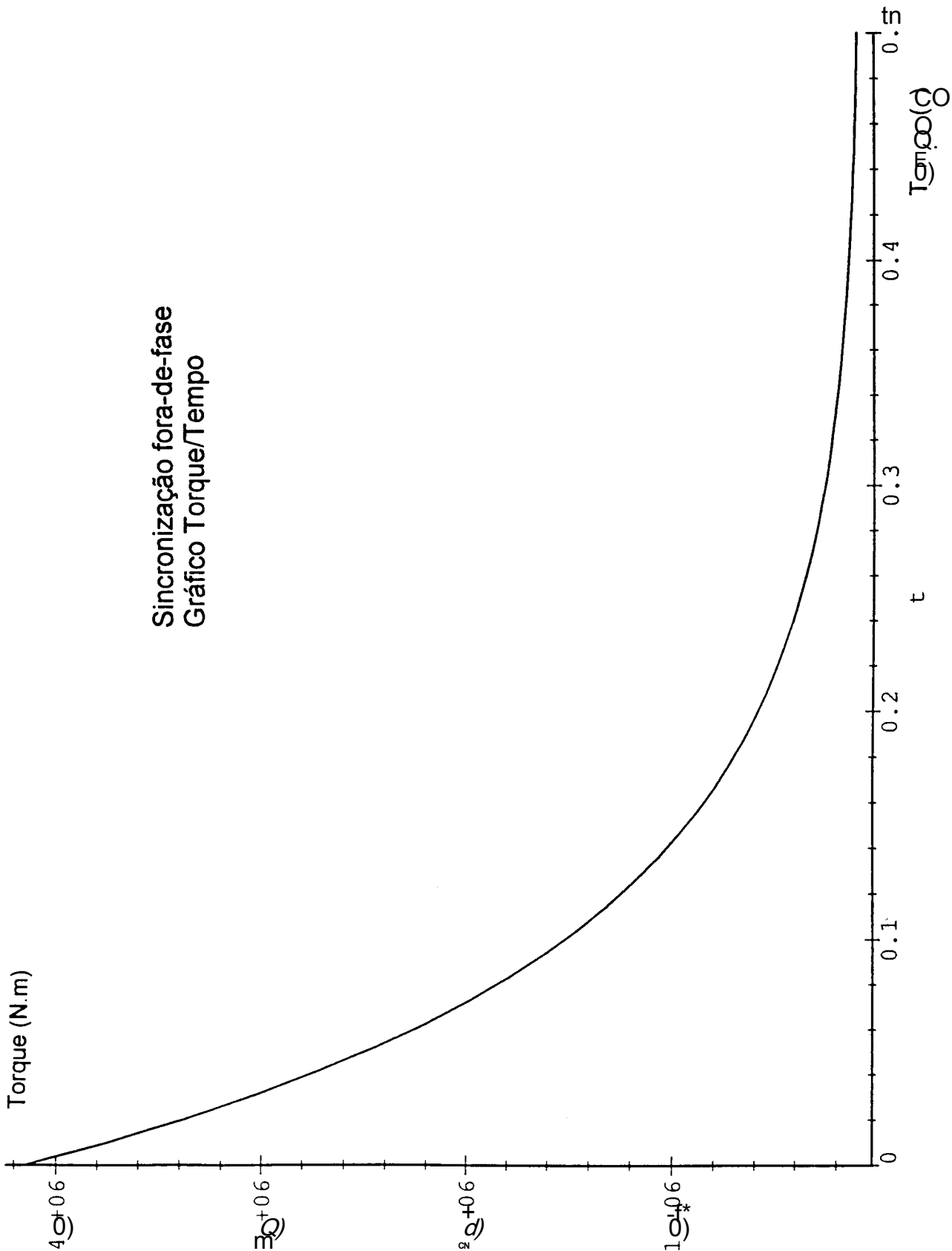


Figura 8.18 - IVlodelo 1 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

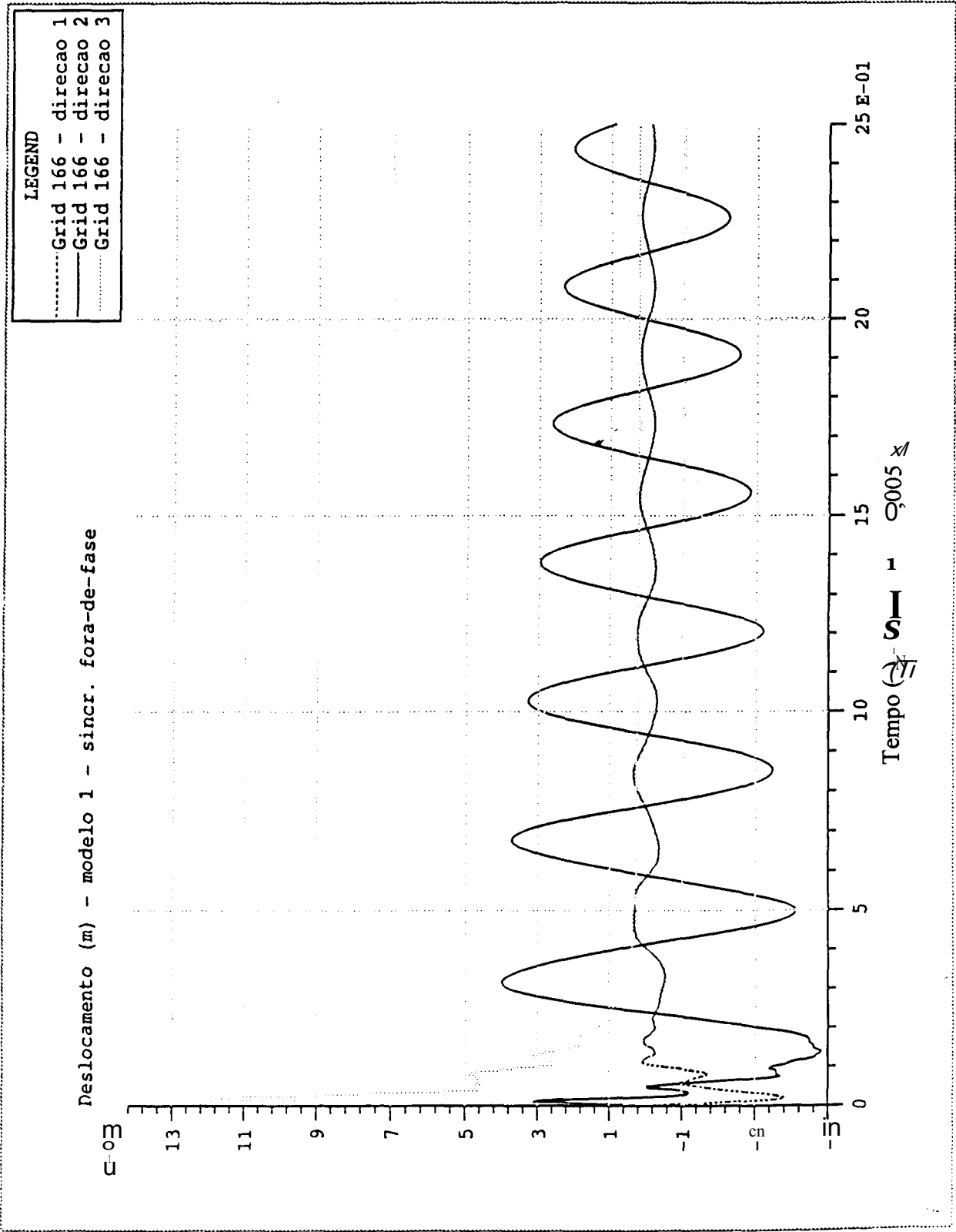


Figura 8.19 - IVlodelo 1 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.

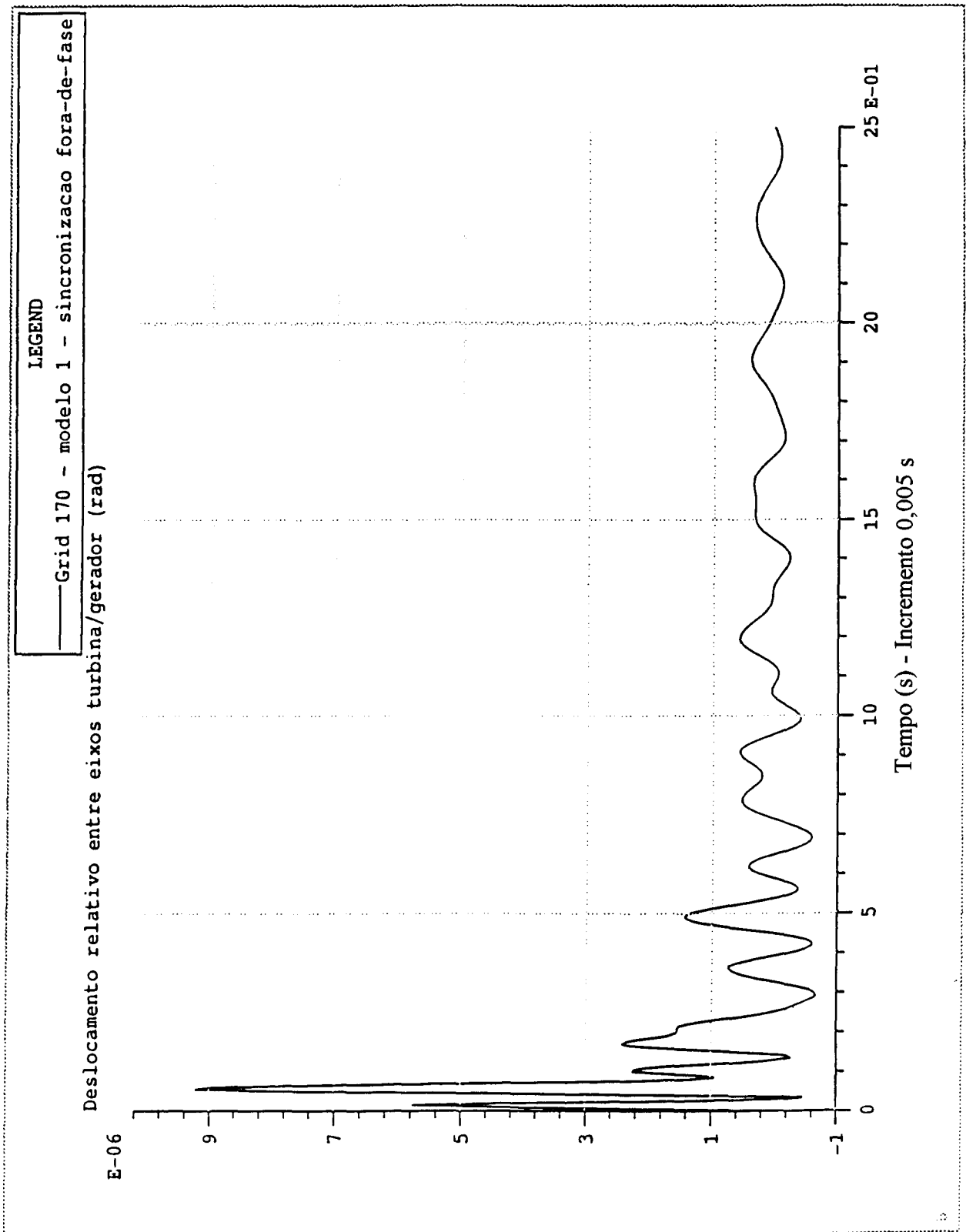


Figura 8.20 - IVlodelo 2 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

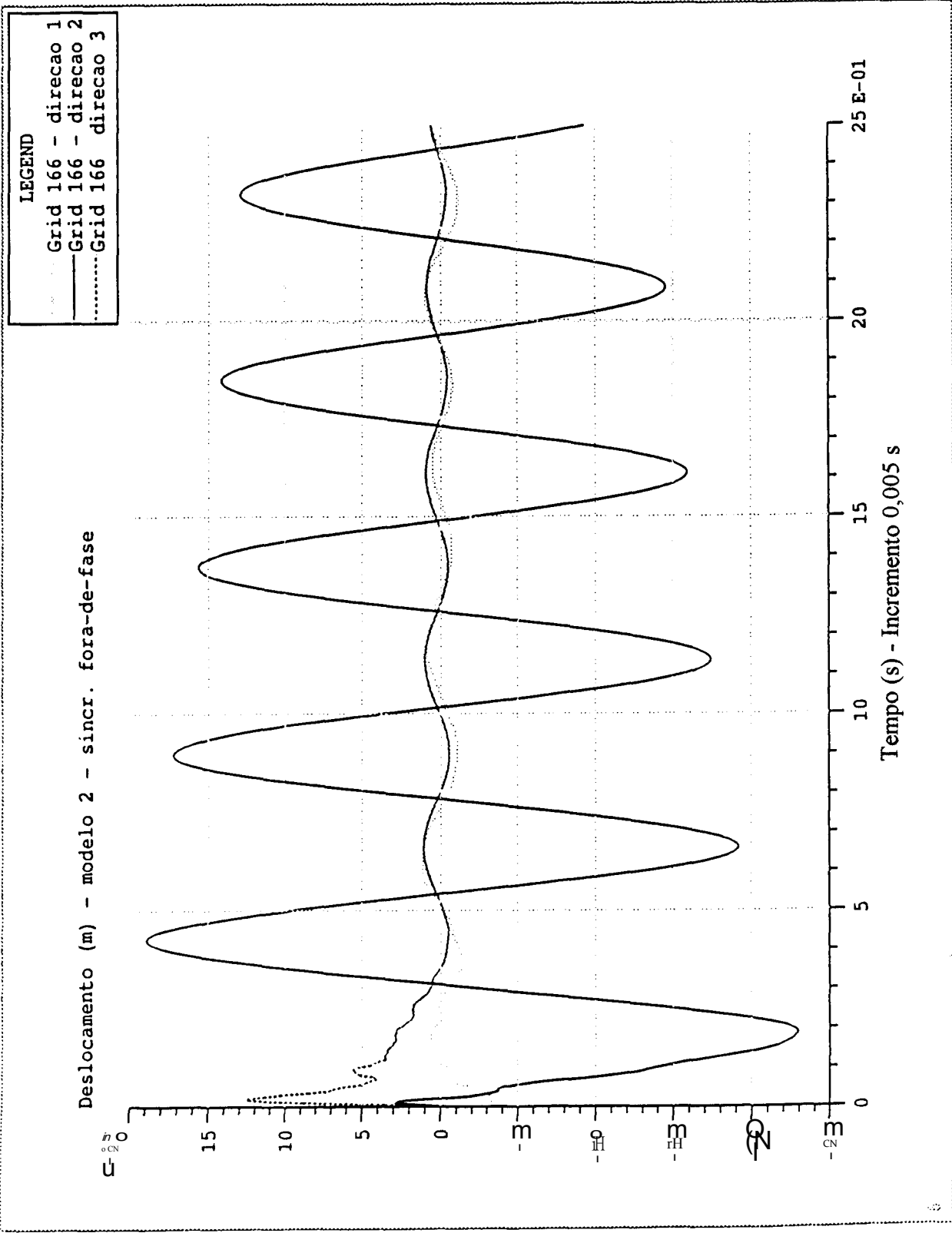


Figura 8.21 - Modelo 2 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.

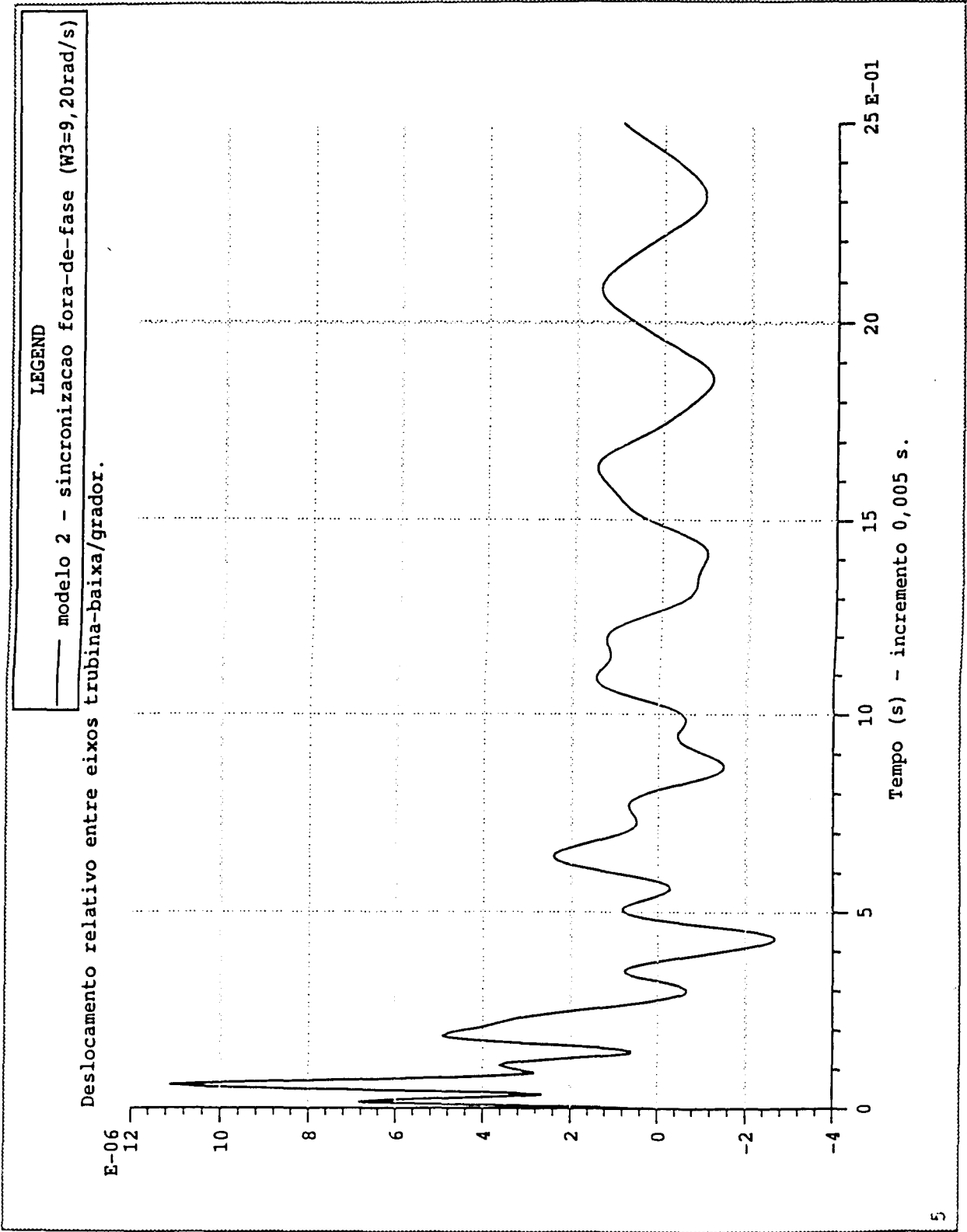


Figura 8.22 - Modelo 3 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos X, Y e Z na 1 a. sapata do gerador.

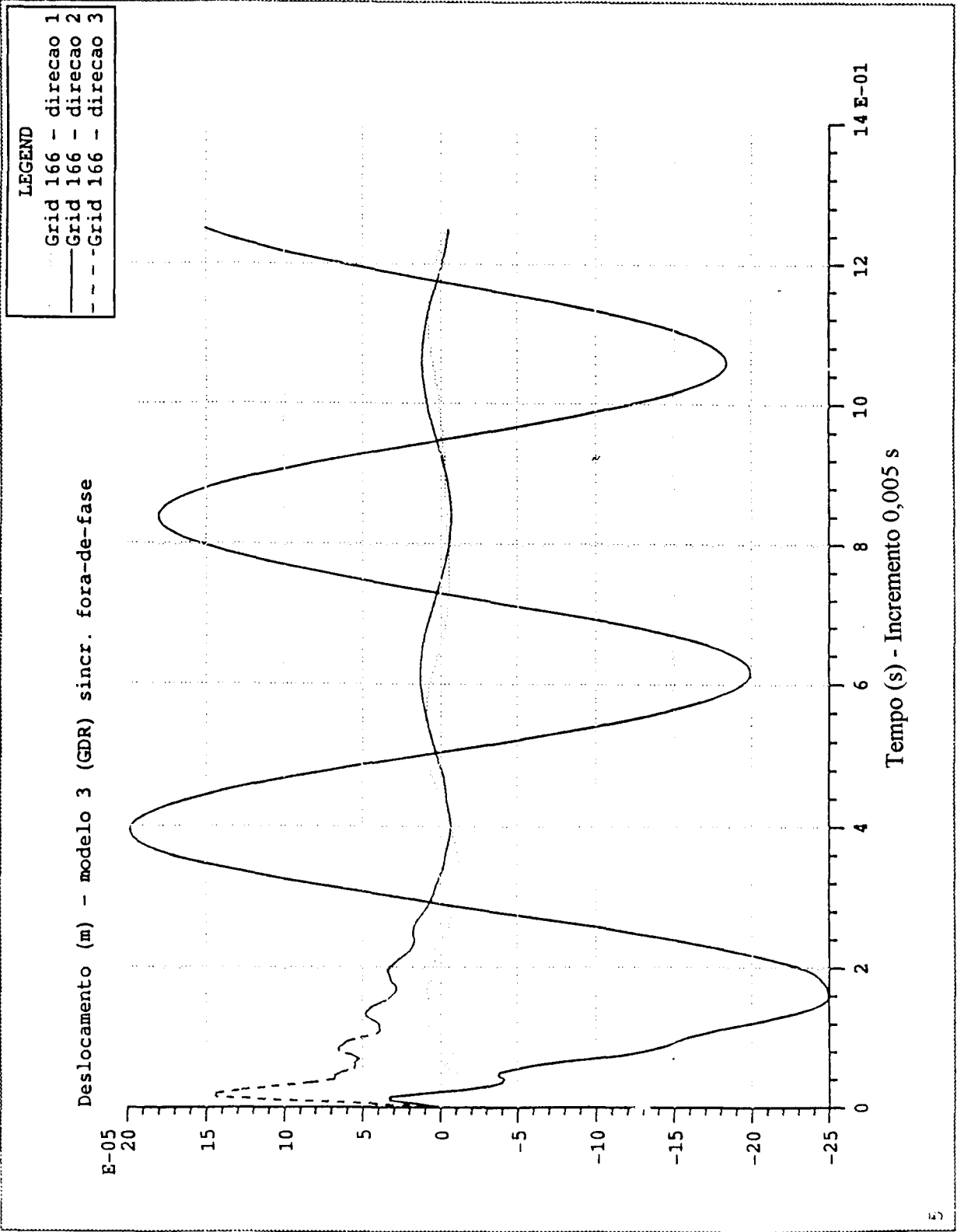
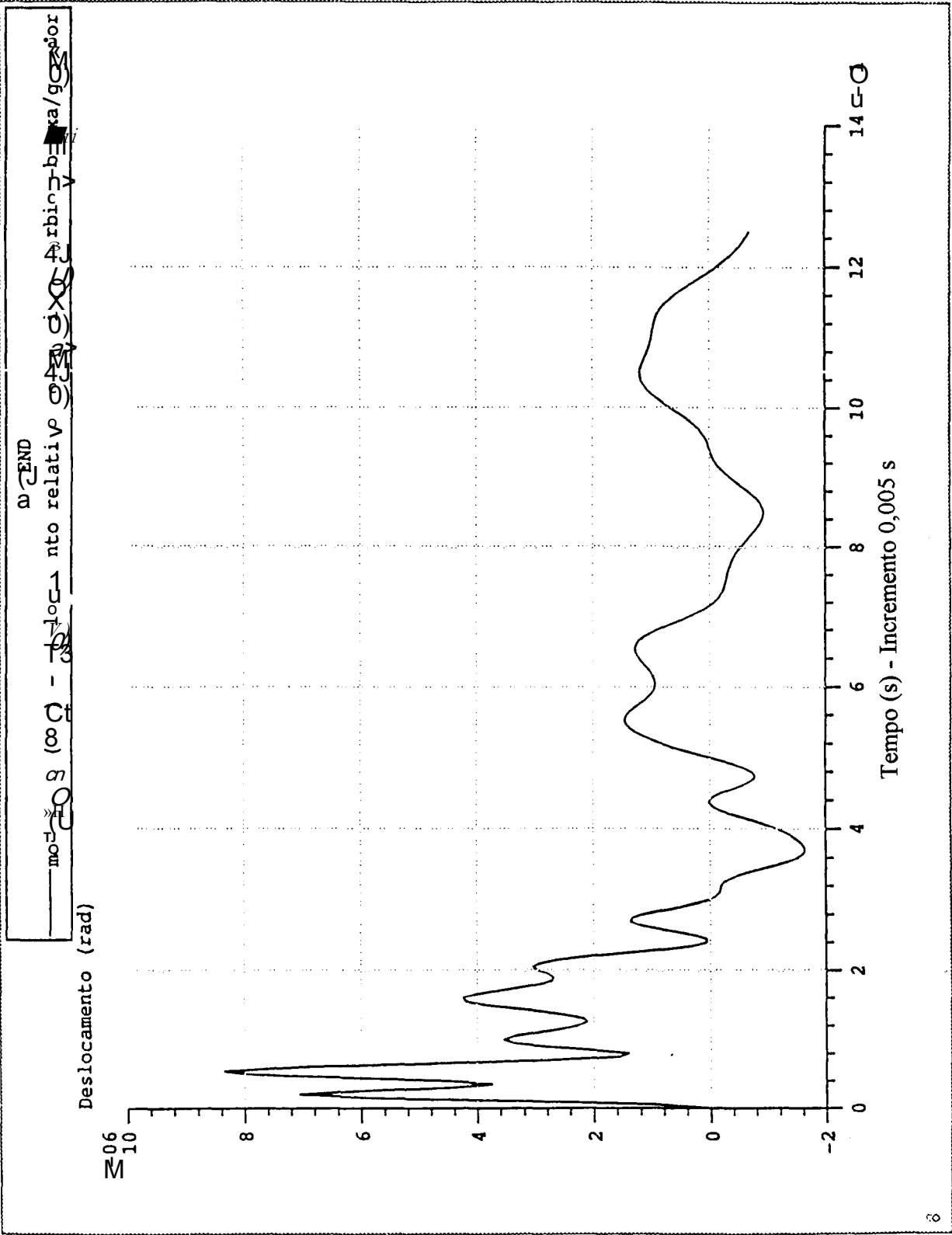


Figura 8.23 - Modelo 3 - Análise transiente - Sincronização fora-de-fase - Deslocamentos relativos entre o eixo da turbina de baixa pressão e o do gerador.



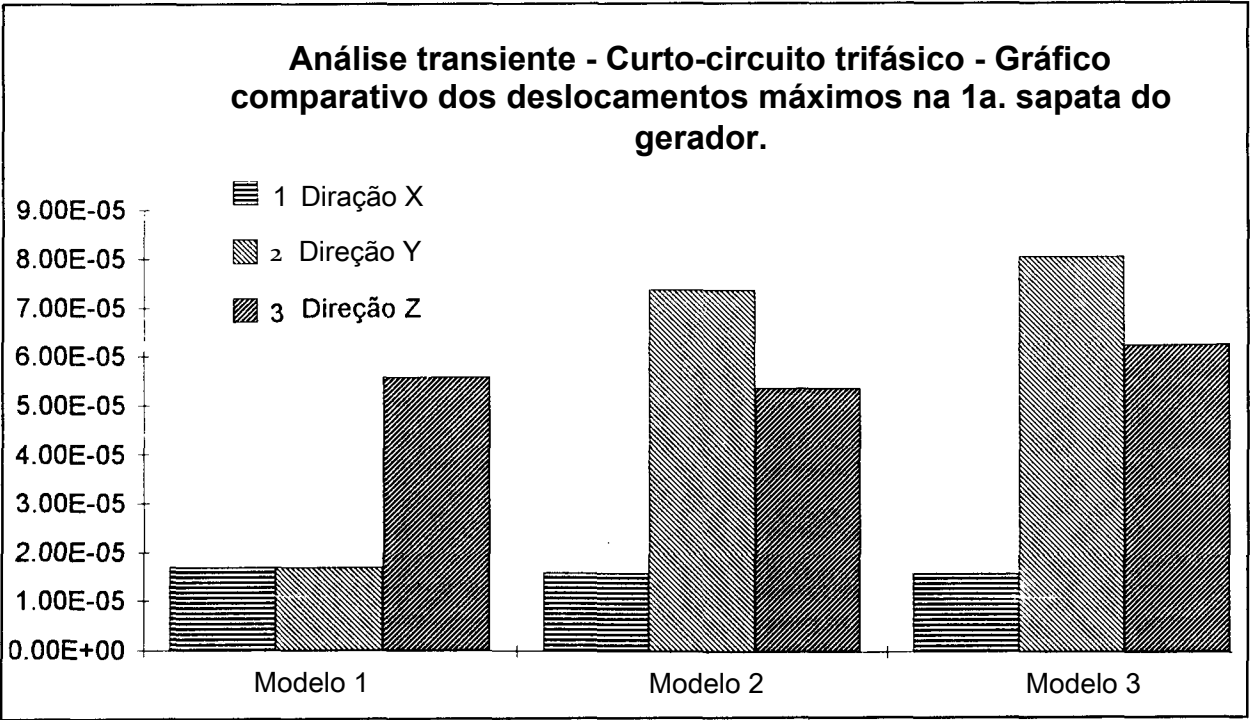


Figura 8.24 - Curto-circuito trifásico - Gráfico comparativo dos deslocamentos máximos na 1 a. sapata do gerador.

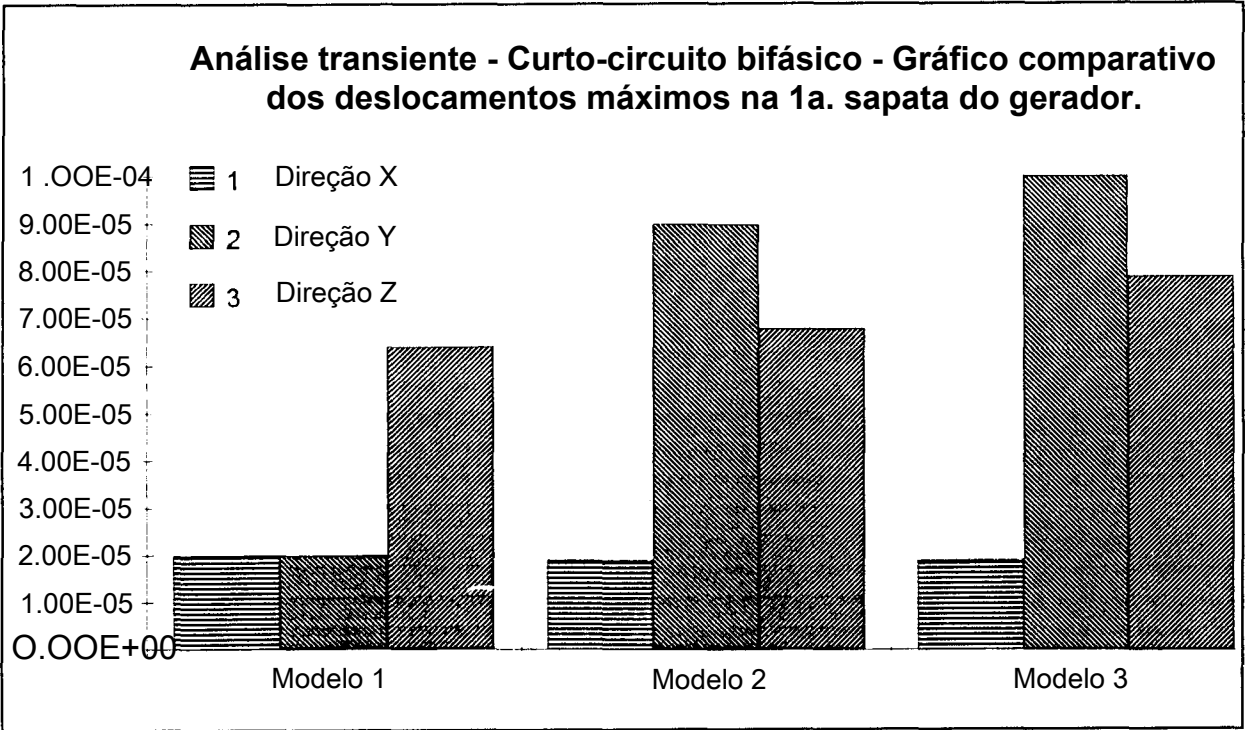


Figura 8.25 - Curto-circuito bifásico - Gráfico comparativo dos deslocamentos máximos na 1 a. sapata do gerador.

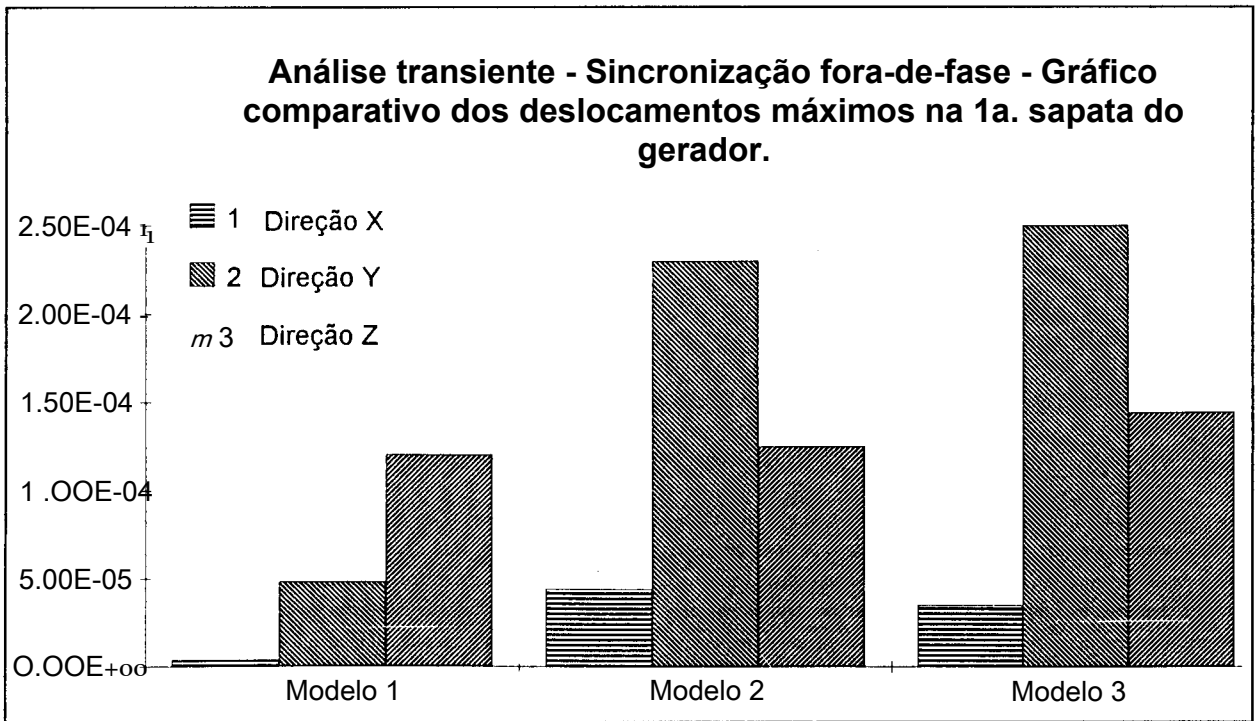


Figura 8.26 - Sincronização fora-de-fase - Gráfico comparativo dos deslocamentos máximos na 1 a. sapata do gerador.

9 - Conclusões.

Os documentos que compõe os projetos de turbogeradores são numerosos e costumam ser elaborados por empresas diferentes, usualmente em distintos países. A interpretação dos documentos para preparar as verificações torna-se uma tarefa difícil, pela quantidade de informações que devem ser aglutinadas e pela nomenclatura adotada nas traduções, que usualmente não é padronizada. Dentro deste contexto, a modelagem de carregamentos ou de massas concentradas, que depende da interpretação dos textos de especificações técnicas ou critérios de projeto, os quais, muitas vezes, não estão redigidos de forma clara, torna-se uma tarefa difícil. No caso presente, alguns dos critérios estão incorretamente especificados, como, por exemplo, o critério para a verificação da flexibilidade dinâmica, que exige que não haja fator de ganho maior do que 1 em toda a faixa de frequências. Também, encontraram-se vários textos em que, para que fossem compreendidos, foram necessários contatos com os redatores. Não é objetivo deste trabalho criticar os critérios de projeto ou de verificação, mas é pertinente e oportuno comentar que a busca de padrões normalizados para redação dos textos técnicos é importante fator de redução de incertezas.

As primeiras estruturas suportes de turbogeradores têm concepção de projeto antiga, quando ainda não havia adequados recursos de cálculo por computador, enquanto que as atuais têm suas dimensões calcadas na comparação com outras estruturas de mesmo porte, cuja operação tenha sido bem sucedida. Este enfoque conservador dá segurança ao projeto mas tem, como consequência, que as ações de operação atuantes sobre a estrutura são pequenas quando comparadas à resistência proporcionada por suas dimensões. Como termo de comparação, no caso presente, pode-se observar que as forças estáticas de operação (oriundas do torque de operação) nas sapatas do gerador são da ordem de 98 kN o que não é suficiente para deformar perceptivelmente a mesa. Mesmo as cargas de vácuo de 1.260 kN em cada apoio do condensador são pequenas quando comparadas à capacidade das colunas que as suportam, de seção 1,2 x 2,3 m, acarretando tensões da ordem de 45 N/cm². Com isso, é forte a razão para se contemplar a idéia de se projetarem suportes mais leves, com a adição de dispositivos passivos, ou ativos, ou ambos, que amortecem as vibrações. O projeto e a avaliação de tais

sistemas deve ser objeto de outros estudos, com base num conhecimento exaustivo do funcionamento e das características do cavalete, para o que se apresentam nesta dissertação contribuições significativas.

A aplicabilidade dos modelos é importante assunto a ser discutido. Com a disponibilidade de grandes computadores, pelo menos a nível de universidades, há uma tendência a se elaborar modelos cada vez maiores e mais sofisticados. Como o custo e o tempo despendidos para modelos maiores é, também, maior, deve-se buscar um tamanho adequado de cada caso, de forma que não se onere desnecessariamente a análise.

Os modelos mais simples têm a vantagem de serem facilmente assimilados pelo analista, que consegue rapidamente estabelecer parâmetros de esforços, tensões, deformações, etc., com um número reduzido de variáveis que os torna baratos. Em certos ramos da matemática essa qualidade é denominada robustez do modelo. Por outro lado, os modelos maiores são mais difíceis de serem assimilados e, pelo tamanho, podem induzir a erros grosseiros de modelagem que passem despercebidos, ainda que, por serem mais sofisticados, tendem a representar melhor as estruturas.

Como foi observado neste trabalho, os primeiros 20 modos apresentaram valores da frequência natural que podem ser considerados bons em todos os quatro modelos. Se um problema de análise dinâmica se restringir a baixas frequências, um modelo mais simples, elaborado com elementos de pórtico espacial, pode ser suficiente. A grande dificuldade será saber se tal modelo simples é suficiente para a análise sem o desenvolvimento de modelos mais sofisticados para comparação. Um procedimento parcimonioso, iniciando-se a modelagem com modelos simples e, depois, sofisticando até que se obtenha confiança nos resultados em toda faixa de interesse, pode ser um método eficaz para reduzir incertezas, que muito analistas experientes utilizam. Isto é, o modelo ótimo deve apresentar, ao mesmo tempo, características de robustez e de precisão.

Lidar com uma grande quantidade de informações pode induzir erros. Modelos com grande quantidade de elementos e carregamentos muito complexos são propensos a erros nos dados implementados oriundos do preparo dos dados ou da digitação. Para evitar erros desse tipo, nesta análise, foram feitas muitas e monótonas revisões dos arquivos de entrada. Nesse processo com muitos números, notou-se

que alguns dos erros não eram percebidos quando a revisão era feita por quem preparou os dados, isto é, o erro era cometido novamente na revisão, provavelmente porque o raciocínio defeituoso ainda estava na memória do analista. A possibilidade de erros fica bastante diminuída quando mais de um analista trabalham juntos verificando um os dados elaborados por outro. A experiência do analista, também é fator importante. O desenvolvimento anterior de outros modelos com finalidade assemelhada traz uma experiência desejada em organizar e preparar as informações, que auxilia na detecção de erros o que certamente reduz as incertezas.

Os três modelos experimentados neste trabalho, mais o modelo desenvolvido para a ELETROSUL, mostram um coeficiente de variação de 6,46% para os valores das frequências dos 20 primeiros modos naturais. Os mesmos três modelos apresentaram os coeficientes de variação de 31,6% para os deslocamentos máximos da análise no domínio da frequência e 33,2% para os maiores deslocamentos encontrados na análise transiente. Por outro lado a experiência CIGRE estabeleceu uma variação de 10,7% em torno da média para valores estáticos dos esforços em membros de torres de linha de transmissão. Apesar do estudo ter sido feito pela mesma pessoa e com apenas três modelos, verifica-se que o modelo exerce substancial influência na variabilidade da resposta que, para deslocamentos provocados por cargas dinâmicas, pode chegar a mais de 30%. É pertinente colocar que a análise original feita para a ELETROSUL, que deveria constituir o 4o. modelo no presente estudo, para todas as análises não foi incluída na base de dados (apenas foi incluída parcialmente na análise modal) por não estarem disponíveis respostas comparáveis para as demais. Sua modelagem era muito parecida com o modelo 1.

Esses resultados, obtidos com considerável investimento de esforço e tempo computacional, serão de grande utilidade na avaliação de confiabilidade de grandes sistemas estruturais - centrais nucleares, barragens, estruturas espaciais - devido á significativa influência da incerteza de modelagem nos resultados da análise e a escassa quantidade de dados experimentais para avaliar dita incerteza até agora disponíveis.

10- Bibliografia

1 - Documentos de projeto, cedidos pela ELETROSUL.

I.a - CONCREMAT- Perfil de Sondagem 1-19 -16/12/1984.

I.b - ELETROSUL - Jacuí I - Thermal Power Plant - Turbine Generator Foundations - Static and Dynamic Analysis - Technical Report - Parte I - BC 1110 RL 1001 - 28/08/1989.

1 .c - ELETROSUL - Turboalternador - Fundações, Turbina - Formas. BC 1111 FR -fis1 a 3-01/07/1988

1 .d - ELETROSUL- Estacas Escavadas O 1000 - Alternativa I (O = 20 mm) - Arma BC 1100 AR B002 -15/08/1986.

I.e - ELETROSUL - Formas - Superestrutura - Planta Cota 28,13 - BC 1120 SF 1001 - 21/08/1986.

I.f - ELETROSUL - Estruturas entre os Eixos 21 e 26 - Estaqueamento - Planta - BC 1120 SF1001 -21/08/1986.

I.g - ELETROSUL - Turboalternador - Formas - Superestrutura - Corte AA - BC 1112 FR 1002-03/07/1989.

I.h - ELETROSUL - Turboalternador - Formas - Superestrutura - Corte BB - BC 1112 FR 1003-03/07/1989.

I.i - NEI PARSONS - Basement Loading Diagram. 158312 - 01/12/83.

I.j - NEI PARSONS - Arrangement & Detail of Flooring & Supports around Turbine. 158312 - fis 1 e2. Setembro, 1989.

l.k - NEI PARSONS - Arrangement & Details of Turbine Concrete Support Structure - 158412-fis 1 a3-27/03/1990.

1.1 - NEI PARSONS - Turbine Support Structure Loading Diagram -158411 - Setembro 1986.

1.m - NEI PARSONS - Arrangement of Plinths and Chases in Basement - 4501 FB 1210 -fis l a5-03/03/1988.

l.n - NEI PARSONS - Bending and Torsional Study of Combined Rotor System - 30/09/1986.

1.0 - VILLARES - Arranjo Geral das Placas de Fundação - 29E117193 Rev. F - 08/12/1988.

1 .p - VILLARES - Dimensões externas - Alternador - 29E117005 - Rev 1c - 25/01/1988.

l.q - VILLARES - Turbogenerador 350 MW - Cargas nas Fundações - CGV 111101 - 09/07/1986.

l.r - VILLARES - Turbogenerador 350 MW - Especificação Recapitulativa sobre Fundação -EGC 11 1102-10/07/1986.

1.s - VILLARES - Turbogenerador 350 MW - Regras para Fundações de Turbogeneradores - EGV111101 -10/07/1986.

1,t - TECNOSOLO - Prova de Carga Vertical a Compressão na estaca E-526 - RS 3661/37 -12/06/1987.

2- BATHE, K. J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis.
Prentice-Hall, New Jersey, 1982.

- 3- EL SHARNOUBY, B.; NOVAK, M. Dynamic Experiments With Group of Piles. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 110, no. 6, junho de 1984 p.719-737.
- 4 - HEARN, G; TESTA, R. B. Modal Analysis for Damage Detection in Structures. Journal of Structural Engineering, v.117, p 3042-3063. 1991.
- 5 - GOTO, Y; YOSHINAGA, K; KURODA, O, Experimental Analysis of Power Plant Vibrations ^ Shaker Test. SAE. Proceedings of the 1991 Noise & Vibration Conference, Traverse City, MI, USA, p 245-254. May13-16 1991.
- 6 - LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. - Consturções em Concreto - Vol. 1 - pp 20,21. Editora Interciência - RJ, 1977.
- 7 - MIRSHAWKA, VICTOR - Probabilidades e Estatística para Engenharia - Livraria Nobel 1a. edição - São Paulo, 1986.
- 8 - MSC/ NASTRAN-MSR-40 The Nastran Theoretical Manual - The MacNeal-Schwendler Corporation. Los Angeles, California, USA. Dec 1972.
- 9 - NOVAK, M.; EL SHARNOUBY, B. Evaluation of Dynamic Experiments on Pile Group ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol 110, no.6, junho de 1984, p.738-756.
- 10- NOVAK, M.; EL SHARNOUBY, B. Stiffness Constants of Single Piles. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol 109, no. 7, julho de 1983, p.961-974.
- 11 - ODEN, J. T.; RIPPERGER, E. A. - Mechanics of Elastic Structures - Hemisphere Publishing Corporation - New York - Second Edition, 1981.
- 12 - PANTELIDES, C.P. - Control of Seismic Response of Turbomachine Foundations. Earthquake Eng. Structure Dynamics v. 20 - n.9 p 839-848. Setembro 1991.
- 13 - RIERA, JORGE D.; ROCHA. MARCELO M.; - Princípios para Projetos ^ Estruturas - Comitê Latino-Americano de Estruturas - CLAES - Montevideo, novembro de 1993, p. 7-10.

14 - ROCHA FILHO, PEDRICTO; ROMANEL, CELSO; SAYÃO, ALBERTO S. J. F. Interpretação dos Ensaios SPT. CPT, Palheta e Pressiométricos para Projetos Geotécnicos. PUCRJ, Março 1983.

15 - SHETA, M.; NOVAK, M. - Vertical Vibration of Pile Groups.

ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol 108,no. GT4, abril de 1982. p.570-590.

16-TMOSHENKO, S. P. ; GOODIER, J. N. - Theory of Elasticity - International Student Edition - McGraw Hill/Kogakusha - Tokio, 1970.

Anexo - Projeto de instrumentação.

A.1 - Instrumentação da estrutura.

É de interesse geral, tanto por parte da proprietária da usina, como dos fornecedores e, sobretudo, da comunidade técnica, saber a resposta real da estrutura para compará-la com as previsões teóricas. Com esta finalidade um projeto de instrumentação está apresentado adiante.

A.2 - Determinação experimental dos modos naturais.

Para a determinação experimental dos modos e frequências naturais de vibração é necessário que se provoque uma excitação na estrutura, o que pode ser feito por várias maneiras. Uma primeira alternativa seria a excitação por impacto, que descartou-se para este projeto por ser necessária uma massa (martelo) muito grande. Outra seria usar um excitador harmônico, método também desconsiderado por não existir no país equipamento com o porte necessário. A solução mais interessante para este caso é o uso de uma peça tracionada por um macaco hidráulico e provida de um fusível mecânico, isto é, uma barra que apresente uma fratura frágil para uma carga próxima de 200 kN. Esta carga provocará um deslocamento estático da ordem de 1 mm que, após a ruptura da barra produza acelerações e deslocamentos dinâmicos suficientes para serem lidos pelos acelerômetros e deflectômetros disponíveis.

Os acelerômetros serão colocados nas regiões onde se esperam os maiores deslocamentos para os modos de frequências mais baixas, proporcionando leituras mais acuradas.

Tirando partido de que o cavalete está totalmente envolto pela estrutura do edifício da casa de máquinas, existindo vigas e lajes independentes do cavalete que permitem fixação de instrumentos de leitura de deslocamentos absolutos, podem-se usar transdutores do tipo LVDT (Linear Voltage Displacement Transducer), tendo a extremidade de referência fixa na estrutura do edifício e outra no cavalete. Transdutores do tipo LVDT também podem ser usados nas medições de frequências naturais, colocando-se nas posições indicadas na figura 9.1, onde, com essa disposição, podem-se medir os maiores deslocamentos da mesa provenientes

de vibrações correspondentes aos três primeiros modos. Para medir deslocamentos da mesa provenientes de outros modos é necessário que se modifique a posição dos LVDT ou, se houver disponibilidade, instalar mais transdutores.

Prevê-se, neste projeto um sistema de aquisição de dados com capacidade mínima de 6 leituras simultâneas.

A.3 - Determinação das respostas às excitações harmônicas nos mancais.

Este ensaio requer a utilização de um excitador harmônico capaz de aplicar uma carga de 10 kN variando a frequência até 65 Hz e as respostas desejadas são deslocamentos. O excitador será colocado em cada mancai de turbina e sua frequência de excitação variará de 0 a 72 Hz com o objetivo de obter acelerações e deslocamentos do mancai excitado e os deslocamentos relativos entre o mancai excitado e os mancais adjacentes.

Observou-se na *análise no domínio da frequência* que os deslocamentos de maior valor são transversais (direção y). Estes deslocamentos são os mais importantes para o fenômeno de desalinhamento dos eixos e devem ser medidos. Uma vez que as transversinas são muito rígidas para cargas axiais, podem-se fixar LVDT's nas suas extremidades e obter uma leitura com boa aproximação dos deslocamentos transversais dos mancais que se apoiam nela. Deve-se fixar um LVDT em cada transversina adjacente para obtenção de deslocamentos relativos (desalinhamentos).

Os acelerômetros devem ser colocados diretamente na posição dos mancais, um em cada direção, aproveitando as cavidades e ressaltos existentes.

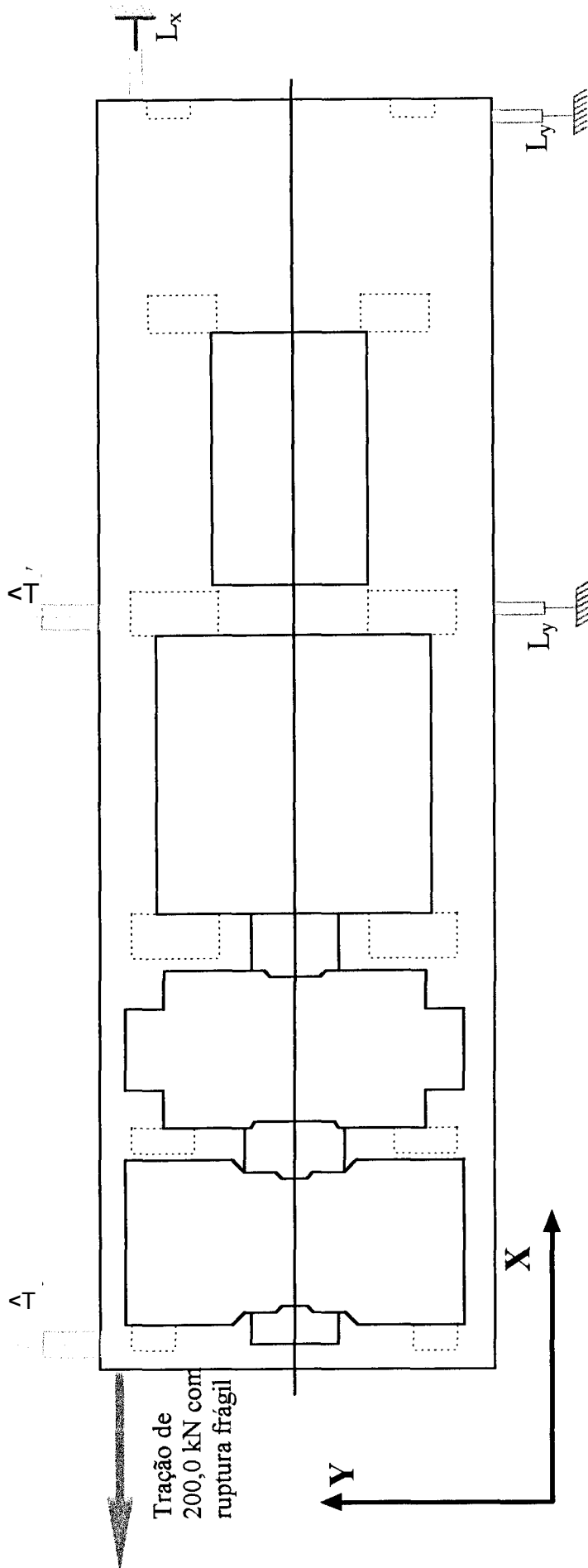
A.4 - Comentários sobre o projeto de instrumentação.

A frequências próximas das de operação da máquina podem ser influenciadas pelas dos equipamentos instalados no prédio e pelas induções provenientes das instalações elétricas. Portanto, na determinação das frequências naturais, os valores confiáveis são os modos mais baixos.

O equipamento destinado a obter respostas para excitação harmônica não está disponível, mas o ensaio só pode ser executado com ele. Se houver oportunidade de ser adquirido o procedimento para determinação das frequências naturais pode

ser alterado, usando-se o excitador harmônico para varrer a faixa de frequências de Interesse. Entretanto, o projeto está apresentado de forma que torne viável, pelo menos, o ensaio e determinação dos modos naturais com os equipamentos que estão disponíveis.

Fig. A.1 - Projeto de instrumentação para determinação dos modos naturais



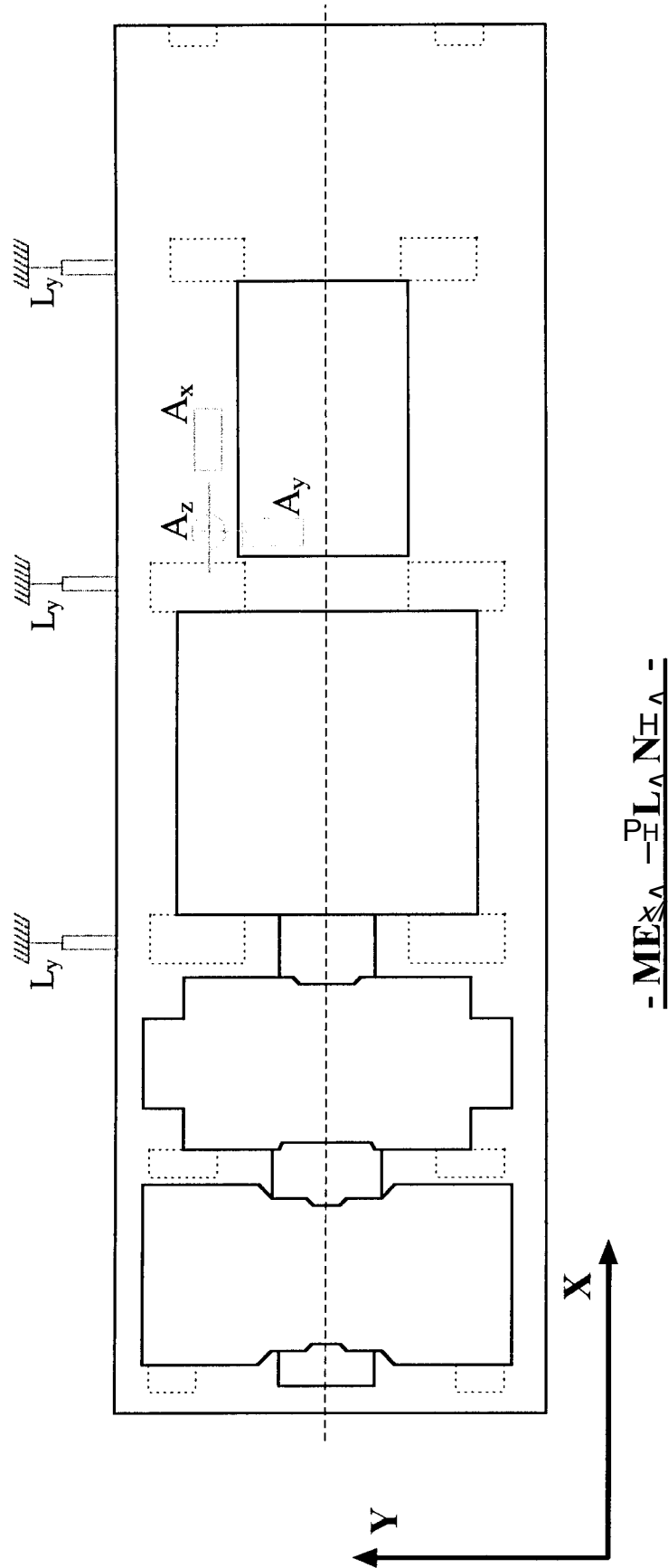
-MEQA-P- I A -

Convenção - Instrumentos: A = acelerômetro; L = LVDI; Orientação (índice). Ex.: A_x = acelerômetro na direção x.

22. \exists sistema de aquisição de dados com capacidade para ≤ 3 leituras simultâneas; \exists acelerômetros;

LVDT (Linear Voltage Displacement Transducer) com capacidade de leitura de 1,5 mm de deslocamento; 1 fuso mecânico para ruptura frágil com 200 kN.

Fig. A.2 - Projeto de instrumentação para determinação das respostas à excitação harmônica



- Convenção - Instrumentos: A = acelerômetro; L = LVDI; Orientação (índice). Ex.: Λ_x = acelerômetro na direção x.
- Equipamento necessário:
- Sistema de aquisição de dados com capacidade para 6 leituras simultâneas;
- 3 acelerômetros;
- 3 LVDI's (Linear Voltage Displacement Transducer) com capacidade de leitura de 1,5 mm de deslocamento;
- 1 excitador harmônico para carga de 10 kN.